

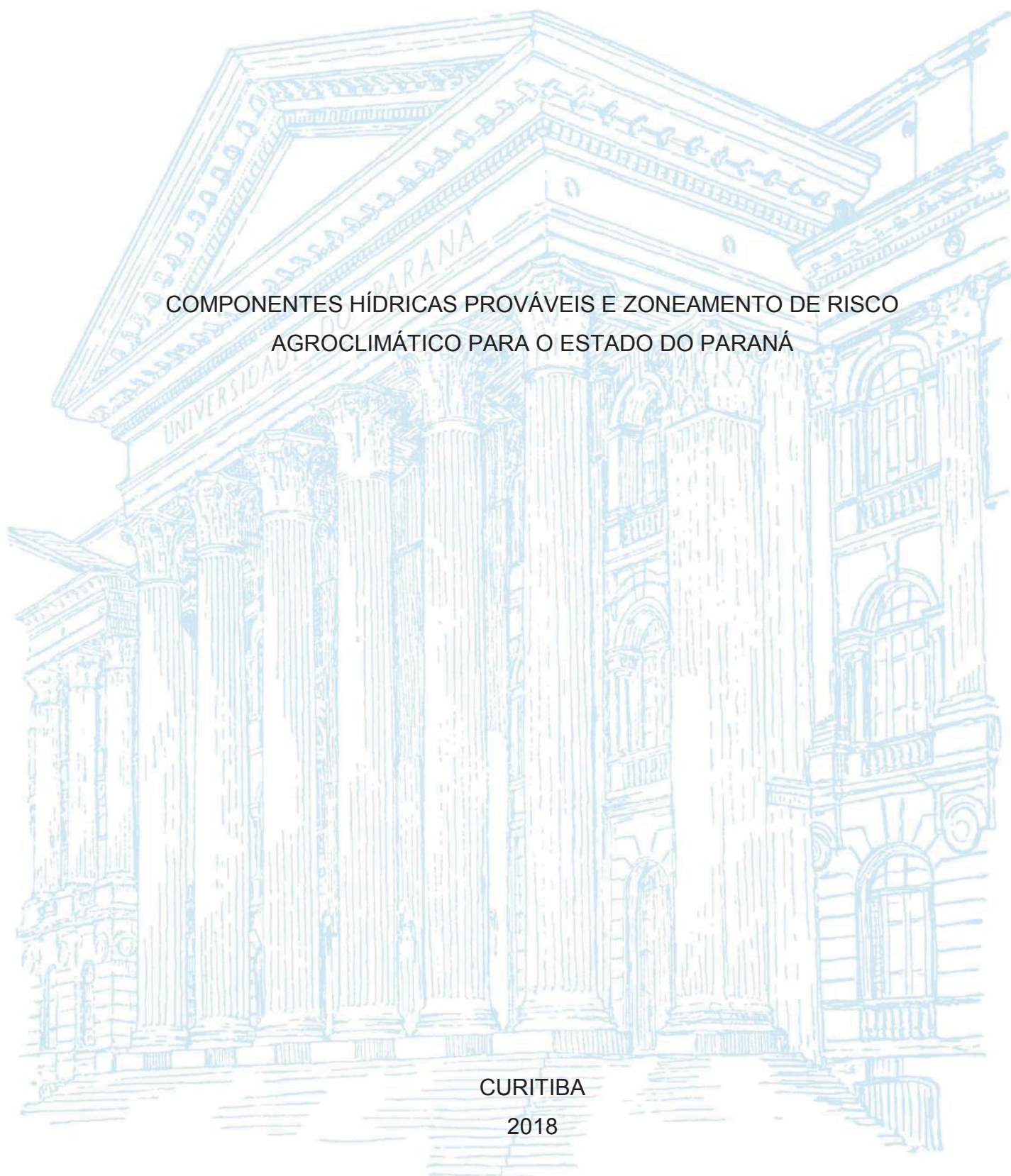
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO CESAR GURSKI

COMPONENTES HÍDRICAS PROVÁVEIS E ZONEAMENTO DE RISCO
AGROCLIMÁTICO PARA O ESTADO DO PARANÁ

CURITIBA

2018



BRUNO CESAR GURSKI

COMPONENTES HÍDRICAS PROVÁVEIS E ZONEAMENTO DE RISCO
AGROCLIMÁTICO PARA O ESTADO DO PARANÁ

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Qualidade, manejo e conservação do solo e da água, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza.

Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR –
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, DOUGLAS ALEX JANKOSKI CRB 9/1167
COM OS DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

G981c Gurski, Bruno César
Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco
agroclimático para o estado do Paraná / Bruno César
Gurski. - Curitiba, 2018.
127 f.: il., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação
em Ciências do Solo.
Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza
Coorientador: Alexandre Cândido Xavier

1. Balanço hidrológico. 2. Zoneamento agrícola. 3.
Evapotranspiração. I. Souza, Jorge Luiz Moretti de. II.
Xavier, Alexandre Cândido. III. Título. IV. Universidade
Federal do Paraná.

CDU 631.432(816.2)




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de BRUNO CESAR GURSKI intitulada: Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o estado do Paraná, após terem ouvido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.


Curitiba, 20 de Fevereiro de 2018.


JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA
Presidente da Banca Examinadora


ALEXANDRE CÂNDIDO XAVIER
Avaliador Externo


RICARDO AUGUSTO DE OLIVEIRA
Avaliador Externo


PAULO HENRIQUE CARAMORI
Avaliador Externo


VOLNEI PAULETTI
Avaliador Interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido sabedoria, disposição e saúde para que eu pudesse chegar até aqui, sem qualquer tipo de impedimento.

À minha família: pelo apoio, incentivo e me ajudarem em todos os momentos de estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade em cursar o doutorado e realizar este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, pela amizade, ensinamentos, auxílio, ideias, sugestões e críticas ao bom andamento deste trabalho, minha formação e minha vida pessoal.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier, pelo auxílio, ideias, sugestões e críticas ao bom andamento deste trabalho, e pela cessão de dados sem os quais esse trabalho não seria realizado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual não seria possível a conclusão deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e outros programas, por seus valiosos ensinamentos que nos inspiram e fazem sempre querer continuar e melhorar.

Aos meus colegas e amigos da turma de mestrado e doutorado que muito colaboraram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Teve-se como objetivo no presente trabalho avaliar métodos alternativos para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), determinar os valores prováveis das componentes do balanço hídrico agrícola (BHA), bem como estabelecer o zoneamento de risco agroclimático para as culturas milho e soja no Estado do Paraná. O trabalho foi estruturado em quatro capítulos: Métodos alternativos de estimativa evapotranspiração de referência para os principais tipos climáticos do Paraná; Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência prováveis no Estado do Paraná; Balanço hídrico agrícola provável para as culturas milho e soja no Estado do Paraná; Zoneamento de risco agroclimático para as culturas milho e soja no Estado do Paraná. A área de estudo considerou todo o Estado do Paraná, os dados climáticos foram disponibilizados por diferentes instituições de pesquisa. As séries temporais tiveram 34 anos (1980 a 2013), e foram espacializadas em *grid* regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, por meio dos melhores interpoladores obtidos por validação cruzada. A ET_o foi estimada com o método de Penman-Monteith ASCE. Foram testados cinco métodos alternativos de estimativa da ET_o . O BHA foi calculado para as culturas milho e soja, com o modelo AquaCrop, considerando variáveis climáticas, pedológicas e culturais. As componentes hídricas – precipitação (P), ET_o , evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração real (ET_r), deficiência hídrica (Def) e armazenamento de água no solo (S) – foram calculadas com periodicidade diária, depois agrupadas em decêndios e ajustadas a funções densidade de probabilidade (fdp 's) para estabelecer os valores de ocorrência a diferentes níveis de probabilidade. As componentes hídricas foram espacializadas utilizando interpolação com *krigagem* ordinária. O método de Hargreaves-Samani tem melhor desempenho entre os métodos testados para estimar a ET_o , para os principais tipos climáticos do Estado do Paraná, e o método de Camargo fornece menores erros. As fdp 's Gama e Exponencial são as que melhor se ajustam à precipitação decendial, enquanto as fdp 's Gama e Normal se ajustam à ET_o e às componentes de saída do balanço hídrico (S , ET_r , Def). Por outro lado, a distribuição Uniforme teve baixa frequência de ocorrência, podendo ser descartada para ajustes futuros. Considerando todo o Estado do Paraná, em média, a cultura da soja tem menor problema com restrição hídrica em relação ao milho, se semeada no decêndio 29 (08 a 17 de outubro), considerando cenário intermediário de disponibilidade hídrica ($ET_{r25\%} - P_{75\%}$). Em média, considerando os riscos hídricos e térmicos, os decêndios 30 (18 out) e 35 (07/dez) são os mais favoráveis à semeadura do milho e soja no Estado do Paraná, respectivamente, persistindo até meados de Janeiro. A principal diferença das metodologias de zoneamentos de risco climático de entidades públicas governamentais está no uso da probabilidade para estimar os valores de ocorrência das variáveis climáticas.

Palavras-chave: Balanço hídrico agrícola. Função densidade de probabilidade. Zoneamento agrícola. Evapotranspiração. Aquacrop.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate alternative methods for estimating reference evapotranspiration (ET_o) to determine the probable values of the components of the agricultural water balance (AWB), as well as to establish the agroclimatic risk zoning for the crops corn and soybean in the Paraná State. The work was structured in four chapters: Alternative methods of reference evapotranspiration for the main climatic types of Paraná; Probable precipitation and reference evapotranspiration in the Paraná State; Probable agricultural water balance for crops corn and soybean in the Paraná State; and, Agroclimatic risk zoning for crops corn and soybean in the Paraná State. The study area considered the entire Paraná State, climatic data were available by different research institutions. The time series were 34 years (1980 to 2013), spaced in a regular grid of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, using the best interpolators obtained by cross-validation. The ET_o was estimated using the Penman-Monteith ASCE method. Five alternative methods of estimating ET_o were tested. The AWB was calculated for crops corn and soybean, using the AquaCrop model, considering climatic, pedological and crop variables. The water components – precipitation (P), ET_o , crop evapotranspiration (ET_c), real evapotranspiration (ET_r), water deficit (Def), soil water storage in the root zone (S) – were calculated daily, then grouped in ten-days and adjusted to probability density functions (pdf 's) to establish the occurrence values at different probability levels. The water components were spatialized using interpolation with ordinary kriging. The Hargreaves-Samani method performs better among the methods tested to estimate ET_o , for the main climatic types of the Paraná State, and the Camargo method provides smaller errors. The pdf 's Gamma and Exponential are the ones that were best adjusted to the decennial precipitation, while the pdf 's Gamma and Normal adjusted to ET_o and the AWB output components (S , ET_r , Def). On the other hand, the pdf Uniform had a low frequency of occurrence and could be discarded for future adjustments. Considering the whole of the Paraná State, on average, soybean has less problem with water restriction than corn, if sown in decennial 29 (October 08 to 17), considering an intermediate scenario of water availability ($ET_{r25\%} - P_{75\%}$). On average, considering the water and thermal risks, the decennials 30 (18/oct) and 35 (07/dec) are the most favorable to the sowing of corn and soybean in the Paraná State, respectively, and persist until mid January. The main difference between the methodologies of climate risk zoning of public governmental entities is in the use of probability to estimate the occurrence values of the climatic variables.

Keywords: Agricultural water balance. Probability density function. Agricultural zoning. Evapotranspiration. Aquacrop.

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANA	– Agência Nacional de Águas
BHA	– Balanço hídrico agrícola
<i>c</i>	– Índice de desempenho proposto por Camargo & Sentelhas (1997)
<i>d</i>	– Índice de concordância proposto por Willmott et al. (1985)
Def	– Deficiência hídrica
ET _c	– Evapotranspiração da cultura
ET _o	– Evapotranspiração de referência
ET _{oPM}	– Evapotranspiração de referência com o método de Penman Monteith
ET _r	– Evapotranspiração real
Exc	– Excedente hídrico
FAO	– Food and Agriculture Organization of the United Nations
<i>fdp</i>	– Função densidade de probabilidade
IAPAR	– Instituto Agrônômico do Paraná
INMET	– Instituto Nacional de Meteorologia
ISNA	– Índice de satisfação de necessidade de água
K _c	– Coeficiente de cultivo
MAPA	– Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
<i>P</i>	– Precipitação pluviométrica
PM	– Penman-Monteith
<i>S</i>	– Armazenamento de água no solo na zona da raiz
<i>T_{máx}</i>	– Temperatura máxima
<i>T_{méd}</i>	– Temperatura média do ar
<i>T_{mín}</i>	– Temperatura mínima
<i>z</i>	– Profundidade efetiva do sistema radicular

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL	10
	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
	MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PARA OBTENÇÃO DAS COMPONENTES HÍDRICAS.....	12
	COMPONENTES HÍDRICAS PROVÁVEIS	14
	ZONEAMENTO DE RISCO AGROCLIMÁTICO	16
	REFERÊNCIAS	18
1	MÉTODOS ALTERNATIVOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA OS PRINCIPAIS TIPOS CLIMÁTICOS DO PARANÁ.....	22
	RESUMO	22
	ABSTRACT	23
1.1	INTRODUÇÃO.....	24
1.2	MATERIAL E MÉTODOS	25
1.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
1.4	CONCLUSÕES.....	33
1.5	REFERÊNCIAS	34
2	PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PROVÁVEIS NO ESTADO DO PARANÁ.....	36
	RESUMO	36
	ABSTRACT	37
2.1	INTRODUÇÃO.....	38
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	39
2.2.1	Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos	39
2.2.2	Probabilidade de ocorrência de precipitação e evapotranspiração de referência.....	42
2.2.3	Espacialização dos valores prováveis para o Estado do Paraná.....	44
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
2.3.1	Funções densidade de probabilidade (fdp).....	44
2.3.2	Funções densidade de probabilidade (fdp).....	46
2.4	CONCLUSÕES.....	50
2.5	REFERÊNCIAS	50
3	BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PROVÁVEL PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA NO ESTADO DO PARANÁ	52
	RESUMO	52
	ABSTRACT	53
3.1	INTRODUÇÃO.....	54
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	55
3.2.1	Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos	55
3.2.2	Cálculo do balanço hídrico agrícola (BHA)	57
3.2.3	Balanço hídrico agrícola provável para o Estado do Paraná	59
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
3.3.1	Funções densidade de probabilidade	61
3.3.2	Componentes hídricas prováveis do balanço hídrico agrícola.....	64
3.4	CONCLUSÕES.....	71
3.5	REFERÊNCIAS	71

4	ZONEAMENTO DE RISCO AGROCLIMÁTICO PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA NO ESTADO DO PARANÁ	74
	RESUMO	74
	ABSTRACT	75
4.1	INTRODUÇÃO.....	76
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	77
4.2.1	Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos	77
4.2.2	Cálculo do balanço hídrico agrícola.....	79
4.2.3	Cálculo dos valores prováveis	81
4.2.4	Necessidades térmicas e hídricas das culturas milho e soja	83
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
4.3.1	Necessidade térmica provável das culturas milho e soja no Estado do Paraná	84
4.3.2	Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos	89
4.3.3	Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos	92
4.4	CONCLUSÕES.....	97
4.5	REFERÊNCIAS	97
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
	REFERÊNCIAS GERAIS	101
	APÊNDICE 1 – PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA	108
	APÊNDICE 2 – CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) COM O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH.....	116
	APÊNDICE 3 – PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA	120
	APÊNDICE 4 – PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE	125
	APÊNDICE 5 – PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA, DAS CULTURAS MILHO E SOJA, NO ESTADO DO PARANÁ.....	126

INTRODUÇÃO GERAL

O entendimento do ciclo hidrológico em grandes regiões é importante em várias áreas do conhecimento, como o ambiental, agrícola, tecnológico, entre outros. Os estudos desenvolvidos subsidiam atividades e decisões voltadas ao planejamento em bacias hidrográficas, geração de energia, abastecimento de água, entre outras (Berner & Berner, 1987). São estudos relevantes e atuais, pois o ciclo hidrológico vem mudando sensivelmente nos últimos anos em todo o mundo. O Brasil vem sofrendo com secas extremas, relacionadas principalmente com baixas precipitações, resultando no esgotamento da umidade do solo. A redução de 20% na precipitação durante três anos (2013 a 2015) foi suficiente para causar sérias condições de escassez de água no País. Por outro lado, chuvas de alta intensidade ocasionam desastres socioambientais e perdas econômicas relevantes (Famiglietti & Rodell, 2013; Getirana, 2016).

O estudo do ciclo hidrológico na agricultura é realizado por meio do balanço hídrico agrícola (*BHA*), que consiste na obtenção das condições reais da água no sistema solo-planta-atmosfera para diferentes locais e períodos (Khazaei & Hosseini, 2015). Diversos autores (Silva et al., 2015; Stagge et al., 2015; Vicente-Serrano et al., 2015) têm enfatizado a necessidade de estudos mais aprofundados para a agricultura em grandes regiões, considerando a variabilidade espacial das componentes hídricas e as probabilidades de ocorrência, por ser uma atividade altamente dependente da disponibilidade hídrica e ligada a incertezas. Apesar de complexos, estudos em grandes regiões agrícolas servem de apoio para o planejamento da atividade agropecuária, manejo de irrigação, previsão de safras, definição de zoneamentos agrícolas, entre outras aplicações (Yan et al., 2012; Souza et al., 2013).

Por outro lado, estudos da variabilidade das componentes hídricas e probabilidades de ocorrência, associados ao zoneamento de risco agroclimático, são importantes instrumentos de política agrícola e de gestão de riscos. A metodologia ganhou importância com a nova dinâmica brasileira de normatização de crédito e seguro agrícolas (Sentelhas et al., 2008; Castro et al., 2010; MAPA, 2016). Desde então, entidades governamentais brasileiras, como o “Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)” e “Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR)”, estabelecem zoneamentos de risco agroclimático para culturas de grande

importância econômica (Caramori, 2003; MAPA, 2016). No entanto, como o MAPA deve elaborar anualmente o zoneamento de risco agroclimático para muitas culturas, em todos os municípios brasileiros, o Orgão necessita realizar generalizações na sua metodologia (MAPA, 2017), que acabam por diminuir a acurácia e aumentam as incertezas dos resultados.

Neste sentido, a metodologia proposta no presente trabalho pode fornecer informações mais precisas, que sirvam de apoio ao cálculo das componentes hídricas e elaboração de zoneamentos de risco agroclimático por instituições públicas e o público em geral. Para demonstrar as divergências, escolheu-se o Estado do Paraná, diante da importância do agronegócio paranaense para o Brasil, e as culturas milho e soja, por serem atividades com maior volume produzido de grãos.

A agricultura é atividade de destaque econômico no Estado do Paraná, responsável por quase 7% do seu Produto Interno Bruto (IPARDES, 2017). Na safra 2016/2017, foram plantados no Estado 2917,0 e 5249,6 mil ha de milho e soja, respectivamente, totalizando 16% do total das áreas plantadas no Brasil. Com produção de 17837,8 e 19586,3 mil t ha⁻¹, correspondendo a 18% e 17% da produção brasileira de milho e soja, respectivamente (CONAB, 2017).

Diante das considerações anteriores, teve-se como objetivo no presente trabalho identificar o melhor método alternativo para estimar a evapotranspiração de referência (*ET_o*), determinar os valores prováveis das componentes do balanço hídrico agrícola, bem como estabelecer o zoneamento de risco agroclimático para as culturas milho e soja no Estado do Paraná.

O trabalho foi estruturado e encontra-se subdividido em quatro capítulos:

- Métodos alternativos de estimativa da evapotranspiração de referência para os principais tipos climáticos do Paraná;
- Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência prováveis para o Estado do Paraná;
- Balanço hídrico agrícola provável para as culturas milho e soja no Estado do Paraná;
- Zoneamento de risco agroclimático para as culturas milho e soja no Estado do Paraná.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PARA OBTENÇÃO DAS COMPONENTES HÍDRICAS

O balanço hídrico agrícola (*BHA*) é essencial para obtenção das condições reais da água no sistema solo-planta-atmosfera agrícola para diferentes locais e períodos. Suas componentes – precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração real (ET_r), deficiência hídrica (Def) e armazenamento de água no solo (S) – podem ser medidas diretamente em campo ou estimadas, a partir de dados climatológicos, utilizando modelos específicos (Khazaei & Hosseini, 2015). No entanto, Yan et al. (2012) enfatizaram a dificuldade da mensuração do *BHA* em campo, a qual é extremamente onerosa do ponto de vista econômico e prático. As dificuldades são acentuadas quando se trata de grandes áreas. Por isso, existem diversos modelos e metodologias no meio científico para estimar as componentes hídricas que correspondam à realidade do sistema em estudo (Tabela 1).

No entanto, a maioria dos modelos requer elevada quantidade de variáveis de entrada e parâmetros que não estão facilmente acessíveis para a diversidade de culturas e ambientes existentes. Por diversas vezes, o usuário necessita de conhecimentos avançados de modelagem matemática, além da especificidade de alguns modelos para realizar os cálculos. Por outro lado, há modelos muito genéricos, que acabam por suprimir informações essenciais para o cálculo do *BHA*, o que acaba gerando erros (Vanuytrecht et al., 2014).

Um modelo muito utilizado foi descrito originalmente por Thornthwaite & Mather (1955), que segue o princípio da conservação de massa, ou seja, o somatório das entradas e saídas é nulo. Originalmente, o modelo proposto é simplificado e utiliza basicamente médias mensais normais de temperatura e precipitação. Por isso, diversos autores (Souza & Gomes, 2007; Souza & Gomes, 2008; Gurski et al., 2016a; Gurski et al., 2016b; Gurski et al., 2016c) têm realizado adaptações na metodologia original, de modo a expandir sua aplicabilidade e melhorar sua acurácia. Apesar de seu bom desempenho, o modelo adaptado de Thornthwaite & Mather (1955) não é tão difundido na literatura, devido às metodologias mais modernas propostas por órgãos de pesquisa especializados.

TABELA 1 – MODELOS UTILIZADOS PARA CALCULAR O BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA, TOTAL OU PARCIALMENTE, CONSIDERANDO AS CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DO LOCAL DE CULTIVO

Itens	Especificação
----- APSIM – Agricultural Production Systems sIMulator (Keating et al., 2003) -----	
Descrição	Simulador de sistemas agrícolas que combina a estimativa do rendimento agrícola em resposta ao manejo, com previsão das consequências à longo prazo das práticas agrícolas sobre os recursos do solo.
Componentes	Culturas, pastagens e florestas; Balanço hídrico do solo e movimento dos solutos; Matéria orgânica do solo e nitrogênio; Resíduos no solo; Fósforo; Solo; Erosão; e, Manejo.
Limitações	Variabilidade espacial dos resultados; Necessidade de grande número de dados de entrada; e, Limitação no número de dados de saída.
Aplicações	Gestão de culturas; Equilíbrio hídrico; Impactos climáticos; Sistemas de cultivo; Interações entre espécies; Uso do solo; Impactos do solo; e, Adaptação das culturas.
----- AquaCrop – Crop-water productivity model (Steduto et al., 2009) -----	
Descrição	Simulador de sistemas agrícolas que combina a estimativa do rendimento em resposta ao manejo e sob diferentes tipos de estresses (hídrico, térmico, salinidade, fertilidade), bem como simulação de balanços hídricos do sistema.
Componentes	Produtividade de culturas, pastagens e florestas; e Balanço hídrico agrícola.
Limitações	Variabilidade espacial dos resultados; Necessidade de grande número de dados de entrada; e, Impossibilidade de inserir ou modificar funções intrínsecas ao modelo.
Aplicações	Estimativa do impacto climático, solos e manejo sobre o rendimento das culturas; Manejo irrigacionista; Gestão de culturas; Previsão de rendimentos e safras; Diagnóstico hídrico de sistemas complexos.
----- CROPSYST – Cropping Systems Simulation Model (Stockle et al., 2003) -----	
Descrição:	Conjunto de programas projetados para trabalhar em cooperação, fornecendo ao usuário ferramentas de análise de produtividade e impacto ambiental de rotações de culturas e manejos de sistemas de cultivo em escalas temporais e espaciais.
Componentes:	Editor de parâmetros; Simulador de sistemas de cultivo; Gerador de clima; Co-operador de simulação GIS-CROPSYST; Ferramenta de análise de bacias hidrográficas; e, Outros programas utilitários.
Limitações:	Dificuldade na avaliação de alguns dados de saída do modelo; Necessidade de muitos dados para avaliar o desempenho do modelo; Escolha de índices quantitativos usados para avaliar o desempenho do modelo; e, A discrepâncias entre os valores simulados e medidos em séries temporais não são devidamente avaliadas.
Aplicações:	Estimativa do impacto climático, solos e manejo sobre o rendimento das culturas; Equilíbrio de água e nitrogênio; Adaptação da cultura à seca; Outros problemas do sistema de cultivo.
----- DSSAT – Decision Support System for Agrotechnology Transfer - Cropping System Model (Jones et al., 2003) -----	
Descrição:	Modelo principal que possui um conjunto de modelos de simulação em seu núcleo, permitindo a simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas.
Componentes:	Meteorológicos; Solo; Solo-Planta-Atmosfera; Modelo de cultura (CROPGRO); Planta (cultivo individual); Manejo; e, Pragas.
Limitações:	Restrição das simulações para algumas culturas; Dificuldade para realizar validação do modelo; e, Algumas variáveis de saída são difíceis de serem avaliadas.
Aplicações:	Manejo de fertilizantes, irrigação, culturas e pragas; Poluição ambiental; Previsão de rendimento; Mudança e variabilidade climática; e, Segurança alimentar.
----- STICS – Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard (Brisson et al., 2004) -----	
Descrição:	Modelo que simula o sistema solo-planta ao longo do ciclo das culturas ou vários ciclos da cultura, simulando rotações de cultivo.
Componentes:	Fenologia; Crescimento do broto; Formação do rendimento; Crescimento radicular; Manejo de culturas; Microclima; e, Balanço hídrico.
Limitações:	Diferença entre as escalas esperadas para os resultados do modelo e as escalas necessárias para descrever os processos; Limitação no número de dados de saída; e, Os mecanismos simulados definem parcialmente o intervalo de validade do modelo, assim certas combinações ambiente/manejo são excluídas da sua gama de aplicações.
Aplicações:	Análise da deficiência hídrica para determinada cultura; Balanço hídrico da cultura; Diagnósticos agrônômicos ou ambientais; Otimização do manejo de culturas; e, Estimação do potencial de um ambiente.

FONTE: Oliveira (2017).

O modelo AquaCrop é uma das metodologias mais difundidas atualmente. Disponibilizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO). O modelo surgiu dos estudos iniciais propostos por Doorenbos & Kassam (1979), e sintetizou diversas metodologias e estudos propostos pela FAO (Allen et al., 1998), culminando na disponibilidade da primeira versão no formato de programa em 2009 (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009). Atualmente o programa encontra-se na sexta versão.

O AquaCrop possui dois módulos principais de cálculo: balanço hídrico e produtividade das plantas. A partir dos dois módulos, são muitas as aplicabilidades do modelo, que envolvem desde a microescala, voltada para propriedade agrícola, até macroescala, como uma região, estado ou país: manejo irrigacionista; rotação de culturas; utilização de solos com limitações; previsão de safras, melhores épocas de plantio; análises de probabilidade; sistemas de suporte à tomada de decisão; efeitos das mudanças climáticas na agricultura; entre outros (Steduto et al., 2012). A metodologia completa utilizada para o cálculo do *BHA* no AquaCrop encontra-se no Apêndice 1.

Por outro lado, o Aquacrop possui algumas limitações, dentre as quais pode-se citar: necessidade de grande número de dados de entrada; necessidade de calibração conforme região e cultura utilizados; impossibilidade de inserir ou modificar funções intrínsecas ao modelo; e, ocorrência de erros caso os dados estejam incompletos.

Atualmente o AquaCrop é considerado ferramenta importante para o planejamento agrícola, pois permite a realização de inúmeras simulações que propiciam a criação de cenários futuros factíveis. Além disso, o programa não necessita de dados provenientes de medidas diretas, permite modelar diferentes situações de estresses e fornece ótima acurácia na estimativa de componentes hídricas e produtividades de várias culturas agrícolas (Vanuytrecht et al., 2014).

COMPONENTES HÍDRICAS PROVÁVEIS

Diversos autores comentam que o simples cálculo das componentes hídricas para grandes regiões não é suficiente. Geralmente, são necessários estudos mais aprofundados, devido à dependência espacial e incertezas inerentes aos fenômenos físicos envolvendo suas estimativas (Silva et al., 2015; Stagge et al., 2015).

A distribuição das componentes hídricas consiste em fenômenos aleatórios, influenciados pela localização geográfica, necessitando de estudos probabilísticos de suas ocorrências (Souza et al., 2013), o que torna as estimativas em macroescala muito mais complexas.

A primeira grande dificuldade para a realização de trabalhos em grandes regiões, atrelada às características intrínsecas das componentes hídricas, refere-se à disponibilidade de séries históricas longas, possuindo dados consistentes, sem falhas ou oscilações, obtidos com mesma instrumentação de mensuração para garantir adequado padrão hídrico. Por isso, muitos trabalhos se limitam a estudar pequenas regiões, como propriedades ou cidades, em que a incerteza é menor (Souza et al., 2013; Jerszurki et al., 2015a; Jerszurki et al., 2015b).

A segunda dificuldade consiste em definir a função densidade de probabilidade (*fdp*) que melhor se ajusta aos dados das componentes hídricas, de acordo com a tendência do próprio fenômeno. As *fdp*'s mais utilizadas são a Exponencial, Gama, Gumbel, Logística, Log-Logística, Lognormal, Normal, Uniforme, Triangular e Weibull. Muitos estudos demonstraram que a distribuição Gama é a que melhor se aplica aos estudos envolvendo chuva provável (Ribeiro et al., 2013; Stagge et al., 2015; Paulo et al., 2016) para períodos inferiores a um mês. No entanto, Souza et al. (2013), Jerszurki et al., (2015a) e Jerszurki et al. (2015b) verificaram a aderência de outras *fdp*'s. Silva et al. (2008) consideram que a distribuição dos dados de *Def* se assemelha à distribuição dos dados de *P*. Em contrapartida, a *ETo* e *ETr* se assemelham aos dados de armazenamento de água no solo (*S*). Siqueira et al. (2008) e Liu & Shao (2014) comentam que a *fdp* que melhor se ajusta aos dados de *S* é a Normal. Pruitt et al. (1972) descreve que os melhores ajustes para *ETo* são obtidos com as *fdp*'s Normal, Gama, Beta e Gumbel. Silva et al. (2015) consideram que as *fdp*'s Gama e Normal são as únicas que mereceriam destaque, sobretudo no dimensionamento de sistemas de irrigação.

Logo, conforme levantamento realizado, verifica-se que não é possível obter unanimidade quanto à *fdp* que melhor se ajusta às componentes hídricas, visto que há inúmeras variáveis envolvidas, como tamanho das séries de dados, presença de falhas, incidência de valores zeros, amplitude de valores, entre outros (Souza et al., 2013).

A terceira dificuldade refere-se aos níveis adequados de probabilidade a serem utilizados nas estimativas. Normalmente, a probabilidade se baseia no nível de risco para a atividade, conforme o grau de certeza e erro da estimativa.

Para a P a recomendação é que não se deve trabalhar com probabilidades inferiores a 75% ou 80%, pois o nível de 75% representa a quantidade mínima de P que se espera ocorrer em três de cada quatro anos (Ribeiro et al., 2013; Souza et al., 2013). Para a ET_o , recomenda-se valores com 25% de probabilidade de serem igualados ou superados (período de retorno de 1,33 anos), para que haja minimização dos riscos e elaboração adequada de projetos agrícolas (Doorenbos & Pruitt, 1977; Vicente-Serrano et al., 2015). Para projetos de irrigação, Doorenbos & Pruitt (1977) estabelecem que os níveis de probabilidade devem ficar entre 75% e 80%. De acordo com Wang et al. (2012), nas condições de irrigação complementar, dificilmente justifica-se, economicamente, adotar níveis superiores a 90% para a precipitação pluviométrica, sendo normalmente utilizados níveis que variam entre 50 a 75%. Jensen (1974) comenta que níveis mais elevados de probabilidade (80% a 90%) são selecionados para culturas de grande valor econômico e condições reduzidas de água disponível no solo.

Devido às três dificuldades apontadas, estudos em grandes regiões que minimizem esses problemas devem ser priorizados e valorizados (Stagge et al., 2015; Vicente-Serrano et al., 2015).

ZONEAMENTO DE RISCO AGROCLIMÁTICO

Uma das aplicações mais importantes do cálculo das componentes hídricas prováveis consiste na definição de zoneamentos agrícolas. Dentre os vários tipos existentes, o zoneamento de risco agroclimático é um dos mais utilizados. O estudo é elaborado com o objetivo de minimizar os riscos relacionados aos fenômenos climáticos e permite identificar a melhor época de plantio das culturas, nos diferentes tipos de solo e ciclos de cultivares. A metodologia ganhou importância com a nova dinâmica de normatização do crédito e seguro agrícola implementada no Brasil, que condiciona a possibilidade de financiamentos e restringe o enquadramento no Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (PROAGRO) aos empreendimentos conduzidos na área de abrangência e sob as condições do zoneamento (Rossetti, 2001; Castro et al., 2010, MAPA, 2016).

Na metodologia do zoneamento de risco agroclimático são analisados e modelados dados de clima, informações fenológicas da cultura, produtividade, ciclos de cultivares e solo. Desta forma, são quantificados os riscos climáticos envolvidos que podem ocasionar perdas na produção, permitindo determinar a melhor época de semeadura e as fases mais críticas da cultura, em que há menor probabilidade de ocorrer adversidades climáticas (Assad & Sano, 1998; Martínez et al., 2016).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) divulga anualmente para todos os Estados brasileiros, por meio de portarias, os municípios aptos e as datas de plantio possíveis para diversas culturas, desde frutíferas até grãos (MAPA, 2016). Para isso, o MAPA utiliza o zoneamento de risco agroclimático, com metodologia própria realizada em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Os principais passos para o cálculo do zoneamento de risco climático no Estado do Paraná para as culturas milho e soja estão descritos a seguir (MAPA, 2017):

i) O balanço hídrico decendial é estimado com o modelo Sarrazon (Baron & Clopes, 1996; Baron et al., 1996), uma adaptação do método de Thornthwaite & Mather (1955), utilizando médias de séries históricas com no mínimo 15 anos de precipitação pluvial e temperatura, provenientes de 466 estações pluviométricas. A ET_o é estimada com o método de Pennam-Monteith, utilizando dados decendiais médios provenientes de 32 estações climatológicas. Os coeficientes de cultivo são obtidos na literatura. Consideram-se solos de textura arenosa, média e argilosa, com capacidade de armazenamento de água de 20, 40 e 60 mm, respectivamente. Obtém-se nos cálculos a ET_c e ET_r ;

ii) O ciclo das culturas é dividido em 4 fases fenológicas: germinação/emergência, crescimento/desenvolvimento, floração/enchimento de grãos e maturação fisiológica. As cultivares são classificadas em três grupos de maturidade: Grupo I ($n < 110$ dias); Grupo II ($110 \text{ dias} < n < 145 \text{ dias}$); e Grupo III ($n > 145 \text{ dias}$), em que n corresponde ao número de dias da emergência à maturação fisiológica;

iii) Calcula-se os valores médios do Índice de Satisfação das Necessidades de Água ($ISNA$) (ET_r/ET_c), por data de semeadura, e localização geográfica das estações climáticas utilizadas (Baron & Clopes, 1996);

iv) São indicados os municípios que apresentam, em pelo menos 20% de seu território, *ISNA* maior ou igual a determinado valor (0,55 para a cultura do milho e 0,60 para soja) na fase de floração/ enchimento de grãos, em 80% dos anos avaliados.

Portanto, conforme observado: o MAPA utiliza séries temporais de dados climáticos relativamente curtas; faz uso de metodologia criticada por vários autores para calcular o balanço hídrico; considera apenas três tipos de solos, sendo que o Paraná possui mais de dez classes de solos diferentes (Bhering et al., 2007); não utiliza a probabilidade de ocorrência das componentes hídricas; não considera componentes hídricas como a deficiência (*Def*) e armazenamento de água no solo (*S*) para calcular o risco; e, não considera a dependência espacial das variáveis (a aptidão para o cultivo se dá por município).

Acredita-se que as informações do zoneamento de risco climático no Estado do Paraná podem ser melhoradas por meio de aprimoramento da metodologia, conforme os avanços obtidos nos últimos anos em relação à disponibilidade de dados, instrumentação e metodologia científica.

REFERÊNCIAS

- Allen RG, Pereira LS, Raes D. Crop evapotranspiration. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56; 1998.
- Assad ED, Sano EE. Sistema geográfico de informações: aplicações na agricultura. Brasília: Embrapa; 1998. 480 p.
- Baron C, Clopes A. Sistema de análise regional dos riscos agroclimáticos (SARRAMET/SARRAZON). Montpellier: CIRAD, 1996.
- Baron C, Perez P, Maraun F. Sarrazon: Bilan hydrique appliqué au zonage. Montpellier: CIRAD, 1996. 26p.
- Berner EK, Berner RA. Global water cycle: geochemistry and environment. New Jersey: Prentice-Hall; 1987, 397 p.
- Bhering SB, Santos HG, Manzatto CV, Bognola I, Carvalho AP, Potter O, Aglio MLD, Silva JS, Chaffin CE, Carvalho Junior W. Mapa de solos do Estado do Paraná. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2007.
- Brisson N, Bussi  re F, Ozier-Lafontaine H, Tournebize R, Sinoquet H. Adaptation of the crop model STICS to intercropping: theoretical basis and parameterisation. *Agronomie*. 2004;24 (6-7):409-421.
- Caramori PH. Zoneamento agrícola do estado do Paraná. Londrina: IAPAR; 2003.
- Castro FS, Pezzopane JEM, Cecílio RA, Pezzopane JRM, Xavier AC. Avalia  o do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2010;14(8):871–880.

- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Séries históricas de área plantada, produtividade e produção, relativas às safras 1976/77 a 2016/17 de grãos. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&Pagina_objcmsconteudos=1#A_o_bjcmsconteudos>. Acesso em 10 jan. 2018.
- Doorenbos J, Kassam AH. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, Rome: FAO, 1979.
- Famiglietti JS, Rodell M. Water in the balance. *Science*. 2013;340(6138):1300-1301.
- Getirana A. Extreme water deficit in Brazil detected from space. *Journal of Hydrometeorology*. 2016;17(2):591-599.
- Gurski BC, Souza JLM, Evangelista AWP, Jerszurki D, Armindo RA. Modelos para estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, feijoeiro e milho. *Irriga*. 2016a;Edição Especial Irrigação:155-167.
- Gurski BC, Souza JLM, Jerszurki D, Armindo RA, Evangelista AWP. Periodicity of crop coefficient and soil water depletion fraction in a climatological water balance. *African Journal of Agricultural Research*. 2016b;11(45):4619-4626.
- Gurski BC, Souza JLM, Jerszurki D, Evangelista AWP, Armindo RA. Specific adjustment functions for daily crop coefficient in Brazil. *International Journal of Current Research*. 2016c;8(8):35537-35542.
- Hsiao TC, Lee H, Steduto B, Basilio RL, Raes D, Fereres E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 2009;101:448-459.
- IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Valor adicionado bruto, participação e taxa de crescimento, segundo as atividades econômicas no Paraná. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/pdf/indices/tab_pib_03.pdf>. Acesso em 10 jan. 2018.
- Jensen ME. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York: ASCE, 1974. 215p.
- Jerszurki D, Souza JLM, Evangelista AWP. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba-PR. *Revista Brasileira de Biometria*. 2015a;33(2):118-129.
- Jerszurki D, Souza JLM, Evangelista AWP. Distribuição de probabilidade e movimento temporal da precipitação na região de Telêmaco Borba, Paraná. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 2015b;10(1):110-116.
- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie JT. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*. 2003;18:235-265.
- Keating BA, Carberry PS, Hammer GL, Probert ME, Robertson MJ, Holzworth D, Huth NI, Hargreaves JNG, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes JP, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow KL, Asseng S, Chapman S, McCown RL, Freebairn DM, Smith CJ. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*. 2003;18(3-4):267-288.
- Khazaei B, Hosseini SM. Improving the performance of water balance equation using fuzzy logic approach. *Journal of Hydrology*. 2015;524:538-548.
- Liu B, Shao M. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*. 2014;517:974-984.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Zoneamento agrícola de risco climático. 2016. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em 10 jan. 2018.

- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Parâmetros de risco agroclimático. 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuário/documentos/Parametrosderiscoclimatico.pdf>>. Acesso em 10 jan. 2018.
- Martínez FEM, Deantonio LY, Araujo GAF, Rojas EO, Gómez-Latorre DA, Alzate DF, Ortiz LA, Aguilera EG, Boshell-Villamarin JF. Agroclimatic zoning methodology for agricultural production systems in dry Caribbean region of Colombia. *Agronomía Colombiana*. 2016;34 (3):374-384.
- Oliveira CT. Modelo AquaCrop: calibração, validação e uso para soja e milho na região dos Campos Gerais. Dissertação de Mestrado. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017.
- Paulo A, Martins D, Pereira LS. Influence of precipitation changes on the SPI and related drought severity: an analysis using long-term data series. *Water Resource Management*. 2016;30:5737-5757.
- Pruitt WO, Oettingen SV, Morgan DL. Central California evapotranspiration frequencies. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 1972;98:177-184.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 2009;101:438-447.
- Ribeiro BT, Ferreira Junior DC, Silva CR. Ten-day probable rainfall for Uberlândia, Minas Gerais State, Brazil. *Bioscience Journal*. 2013;29(3):536-542.
- Rossetti LA. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001;9(3):386-399.
- Sentelhas PC, Santos DL, Machado RE. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. *Ambiágua*. 2008;3(3):28-42.
- Silva JC, Heldwein AB, Trentin G, Streck NA, Martins FB. Funções de distribuição de probabilidade decendial e mensal para a deficiência hídrica no solo. *Ciência Rural*. 2008;38(7):1893-1899.
- Silva AO, Correia JS, Bassoi LH, Teixeira AHC. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, PE. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*. 2015;9(1):30-38.
- Siqueira GM, Vieira SR, Camargo MBP. Variabilidade espacial do armazenamento e perda média diária de água pelo solo no sistema de semeadura direta em Campinas, SP. *Bragantia*. 2008;67(1):213-223.
- Souza JLM, Gomes S. Avaliação e desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2007;29(4):433-443.
- Souza JLM, Gomes S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2008;30(2):153-163.
- Souza JLM, Jerszurki D, Damazio EC. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2013;48(7):693-702.
- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Loonc AFV, Stahl K. Candidate distributions for climatological drought indices. *International Journal of Climatology*. 2015;35:4027-4040.

- Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 2009;101:426-437.
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- Thornthwaite CW, Mather JR. The water balance. Centerton: Laboratory of Climatology, 1955.
- Stöckle AC, Donatelli M, Nelson R. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*. 2003;18:289-317.
- Vanuytrecht E, Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Heng LK, Vila MG, Moreno PM. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environ. Model. Softw.*, 2014;62:351–360.
- Vicente-Serrano SM, Schrier GV, Beguería S, Azorin-Molina C, Lopez-Moreno JL. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology*. 2015;526:42-54.
- Yan H, Wang SQ, Billesbach D, Oechel W, Zhang JH, Meyers T. Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model. *Remote Sensing of Environment*. 2012;124: 581–595.
- Wang P, Song X, Han D, Zhang Y, Zhang B. Determination of evaporation, transpiration and deep percolation of summer corn and winter wheat after irrigation. *Agricultural Water Management*. 2012;105:32-37.

1 MÉTODOS ALTERNATIVOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA OS PRINCIPAIS TIPOS CLIMÁTICOS DO PARANÁ

RESUMO

Teve-se como objetivo no presente trabalho avaliar métodos alternativos de estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o) para os principais tipos climáticos (Cfa e Cfb) do Estado do Paraná. Os métodos alternativos testados foram Budyko, Camargo, Hargreaves-Samani, Linacre e Thornthwaite, os quais foram comparados com a ET_o calculada com o método de Penman-Monteith ASCE (ET_{oPM}) para o período de 1986 a 2015, em oito estações meteorológicas. O desempenho dos métodos alternativos foi avaliado baseando-se no coeficiente de determinação (R^2), índice “ d ” de concordância, índice “ c ” de desempenho e raiz quadrada do erro médio (RMSE). O método de Hargreaves-Samani tem melhor desempenho entre os métodos testados para estimar a ET_o para os principais tipos climáticos do Estado do Paraná. O método de Camargo possibilita menores erros entre os valores padrão de ET_o (Penman-Monteith) e os valores estimados. Os métodos de Thornthwaite, Linacre e Budyko não são adequados para estimar a ET_o em nenhum tipo climático do Estado do Paraná.

Palavras-chave: Modelo. Penman-Monteith ASCE. Cfa. Cfb. ET_o .

ABSTRACT

We aimed to evaluate alternative methods of estimation of reference evapotranspiration (ET_o) for the main climatic types (Cfa and Cfb) of the State of Paraná, Brazil. The alternative methods tested were Budyko, Camargo, Hargreaves-Samani, Linacre and Thornthwaite, which were compared to ET_o calculated using the Penman-Monteith ASCE (ET_{oPM}) method for the period 1986 to 2015, in eight meteorological stations. The performance of the alternative methods was assessed based on the coefficient of determination (R^2), index "d" of agreement, index "c" of performance and root square mean error (RMSE). The Hargreaves-Samani method performs better among the methods tested to estimate the ET_o for the main climatic types of the state of Paraná. The Camargo method allows smaller errors between the standard values of ET_o (Penman-Monteith) and estimated values. The methods of Thornthwaite, Linacre and Budyko are not adequate to estimate the ET_o in any climatic type of the State of Paraná.

Keywords: Model. Penman Monteith ASCE. Cfa. Cfb. ET_o .

1.1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração de referência (ET_o) é fundamental no estudo e determinação das relações hídricas nas atividades de engenharia rural, sendo uma das mais importantes variáveis hidrológicas para determinar a evapotranspiração de culturas, estimativa e interpretação de balanços hídricos agrícolas e gerenciamento de irrigação (Yan et al., 2012). A ET_o pode ser medida diretamente por lisímetros ou evapotranspirômetros, ou estimada baseando-se em variáveis climáticas, como temperatura e radiação solar (Allen et al., 1998; Todorovic et al., 2013; Pereira et al., 2015).

Devido à disseminação de estações meteorológicas e ao alto custo da medição direta, a estimativa da ET_o está sendo utilizada com desempenho satisfatório em todo o mundo (Pandey et al., 2016). Tradicionalmente, o método combinado de Penman-Monteith, parametrizado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO (Allen et al., 1998) e a Sociedade Americana de Engenheiros Civis – ASCE (ASCE-EWRI, 2005) é reconhecido como método padrão para estimar a ET_o (Chauhan & Shrivastava, 2009). No entanto, o uso do método padrão é limitado em muitas regiões brasileiras, devido: à falta de dados necessários para o cálculo; limitações técnicas e econômicas para a instalação de novas estações meteorológicas e manutenção das existentes; e, séries de dados incompletas ou inconsistentes (Souza et al., 2014; Alencar et al., 2015). Mesmo considerando diferentes bases de dados de variáveis meteorológicas em todo o mundo, como a *World Climate Database* (Hijmans et al., 2005), o conjunto completo de dados necessários não está disponível para todas as localidades brasileiras.

Portanto, métodos alternativos desenvolvidos para estimar a ET_o com pequeno número de variáveis climáticas de fácil medida são promissores (Chauhan & Shrivastava, 2009). Ao longo dos últimos 50 anos, muitos modelos alternativos foram desenvolvidos (Penman, 1948; Thornthwaite, 1948; Budyko, 1974; Linacre, 1977; Hargreaves & Samani, 1985), mas a literatura apenas informa seu desempenho comparativo ao método padrão de Penman-Monteith em uma mesma localidade (Syperreck et al., 2008; Trajkovic & Kolakovic, 2009; Silva et al., 2017), com poucos estudos analisando o ajuste sob diferentes tipos climáticos (Todorovic et al., 2013). Devido à variabilidade climática do Estado do Paraná, estudos desta

natureza são importantes, pois permitiriam a identificação de tendências e limitações de métodos alternativos, bem como a escolha do melhor método para cada tipo climático.

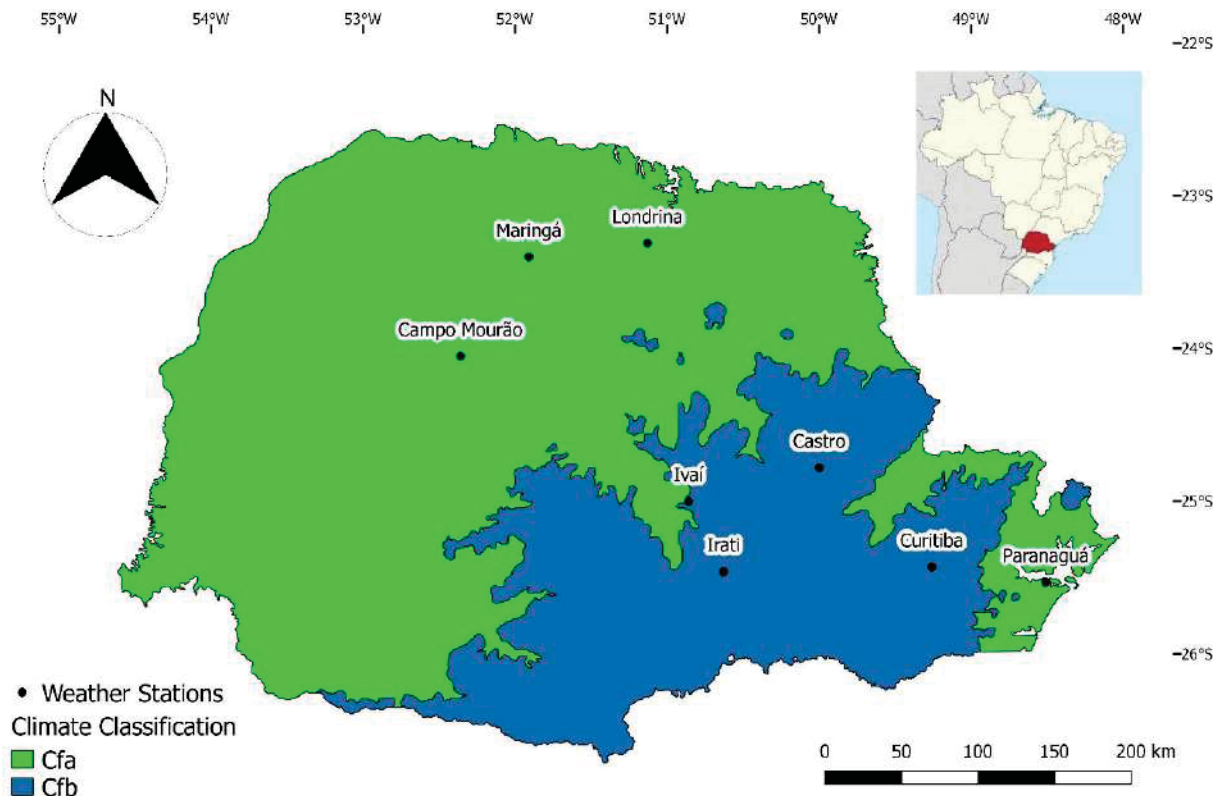
Diante das considerações colocadas, teve-se por objetivo no presente trabalho identificar os principais métodos alternativos de estimativa da evapotranspiração de referência (*ET_o*) em relação ao método padrão de Penman-Monteith ASCE, para os principais tipos climáticos do Estado do Paraná, Brasil.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

As análises foram realizadas para uma série histórica de 30 anos de dados diários (janeiro de 1986 a dezembro de 2015) de temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), umidade relativa (%), radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e velocidade do vento a dez metros de altura (m s^{-1}), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2016), a partir de oito estações meteorológicas automáticas localizadas no Estado do Paraná (Figura 1.1), sob os tipos climáticos Cfa e Cfb, que representam 61,7 e 37,0% da área total, respectivamente. De acordo com Köppen (1936), o clima Cfa é caracterizado como subtropical, com verões quentes, temperatura média anual entre 16 e 18 °C. O Cfb é temperado, sem estação seca, com verões temperados e precipitação média de 1500 mm ano⁻¹ (Alvares et al., 2013).

As estações meteorológicas analisadas (Figura 1.1) foram as únicas no Estado do Paraná com dados representativos suficientes para comparar todos os métodos alternativos de estimativa da *ET_o*, com o método padrão de Penman-Monteith.

FIGURA 1.1 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NOS PRINCIPAIS TIPOS CLIMÁTICOS DO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: adaptado de ITCG (2006).

A evapotranspiração de referência diária (ET_{OPM}) foi estimada com o método de Penman-Monteith (padrão), parametrizado pela *American Society of Civil Engineers* (ASCE-EWRI, 2005) (Apêndice 2):

$$ET_{OPMi} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{Cn}{(T_{med} + 273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + Cd \cdot u_2)}$$

Sendo: ET_{OPMi} – evapotranspiração de referência estimada com o método de Penman-Monteith no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn – radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G – balanço do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); γ_{psy} – constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T_{med} – temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s^{-1}); es – pressão de saturação de vapor (kPa); ea – pressão atual do vapor (kPa); Cn – constante relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados, sendo considerado igual a 900 para a grama batatais (adimensional); Cd – constante relacionada à superfície de referência e intervalo de

tempo adotados, sendo considerada igual a 0,34 para a grama batatais (adimensional).

O déficit de saturação ($e_s - e_a$) diário foi estimado pela diferença entre a pressão de saturação e a pressão atual de vapor de água da atmosfera. A pressão de saturação de vapor foi calculada usando a temperatura do ar com a fórmula de Tetens. A pressão atual de vapor foi obtida multiplicando-se a pressão de saturação pela fração de umidade relativa média diária. A radiação líquida diária da superfície (R_n) foi estimada pela diferença entre a radiação de onda longa e a radiação de onda curta. A radiação de onda longa (R_{nl}) foi obtida pela radiação de ondas curtas (R_s/R_{so}), temperatura do ar e pressão atual de vapor. A radiação de ondas curtas (R_{ns}) foi obtida pela radiação solar incidente (R_s), que foi estimada pela relação entre radiação extraterrestre (R_a) e duração relativa da luz solar (n/N) (Pereira et al., 2015). O fluxo de calor do solo (G) foi calculado utilizando a temperatura do ar (Pereira et al., 1997). As medidas da velocidade do vento foram transformadas para velocidade do vento a 2 m de altura (u_2) pela relação do perfil do vento (Allen et al., 1998).

Os métodos alternativos foram escolhidos baseando-se em informações dispostas na literatura, considerando a simplicidade e variáveis de entrada de fácil obtenção, como a temperatura do ar e radiação solar no topo da atmosfera. Tais aspectos são importantes, pois existem poucas estações meteorológicas no Estado do Paraná que contenham série longa de dados climáticos medidos, com poucas falhas. Na Figura 1.1 encontra-se todas as estações meteorológicas disponíveis pelo INMET (2016) no Estado.

Os métodos alternativos para estimar a ET_o consistiram nos seguintes modelos empíricos: Budyko (1974), Camargo (1971), Hargreaves & Samani (1985), Linacre (1977) e Thornthwaite (1948).

a) Budyko (1974):

$$ET_{oBi} = 0,20 \cdot T_{med i}$$

Sendo: ET_{oBi} – evapotranspiração de referência estimada com o método de Budyko (1974) no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); $T_{med i}$ – temperatura média do ar no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$).

b) Camargo (1971):

$$ET_{oCM i} = Ra_i^* \cdot F \cdot T_{med i}$$

Sendo: $ET_{oCM\ i}$ – evapotranspiração de referência estimada com o método de Camargo (1971) no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); Ra_i^* – radiação solar no topo da atmosfera do i -ésimo dia, expressa em equivalente de evaporação (mm dia^{-1}); F – fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do local (foi utilizado valor igual a 0,01); $T_{med\ i}$ – temperatura média do ar no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$).

A transformação dos valores de radiação solar no topo da atmosfera do i -ésimo dia em equivalente de evaporação (Ra_i^* – mm dia^{-1}) foi realizada conforme proposto por Camargo (1971), a partir da relação:

$$Ra_i^*_{(\text{mm.dia}^{-1})} = \frac{Ra}{2,45}$$

Sendo: $Ra_i^*_{(\text{mm dia}^{-1})}$ – radiação solar no topo da atmosfera no i -ésimo dia, em equivalente de evaporação (mm dia^{-1}); Ra – radiação solar no topo da atmosfera no i -ésimo dia ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

A radiação extraterrestre (Ra) foi obtida de acordo com Allen et al. (1998) (Apêndice 2).

c) Hargreaves & Samani (1985):

$$ET_{oHS\ i} = 0,0023 \cdot Ra_i^* \cdot (T_{med\ i} + 17,8) \cdot (T_{máx\ i} - T_{mín\ i})^{0,5}$$

Sendo: $ET_{oHS\ i}$ – evapotranspiração de referência estimada com o método de Hargreaves & Samani (1985) para o i -ésimo dia (mm dia^{-1}); Ra_i^* – radiação solar extraterrestre no i -ésimo dia, expressa em equivalente de evaporação (mm dia^{-1}); $T_{med\ i}$ – temperatura média do ar no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); $T_{máx\ i}$ – temperatura máxima do ar no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); $T_{mín\ i}$ – temperatura mínima do ar no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$).

d) Linacre (1977):

$$ET_{oLi} = \frac{700 \cdot \frac{T_{med\ i} + 0,006 \cdot z}{100 - \varphi} + 15 \cdot (T_{med\ i} - Td_i)}{80 - T_{med\ i}}$$

Sendo: ET_{oLi} – evapotranspiração de referência estimada com o método de Linacre (1977) para o i -ésimo dia (mm dia^{-1}); $T_{med\ i}$ – temperatura média do ar no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); z – altitude do local (m); φ – latitude do local (graus); Td_i – temperatura de ponto de orvalho no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$).

Conhecendo-se o valor de ea , a temperatura do ponto de orvalho (Td) foi obtida por meio da inversão da equação de Tétens, isolando Td chegando-se à equação:

$$Td_i = \frac{237,3 \cdot \ln ea + 116,9889}{16,777 - \ln ea}$$

Sendo: Td_i – temperatura do ponto de orvalho do ar do i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); ea_i – pressão atual do vapor (kPa) do i -ésimo dia.

e) Thornthwaite (1948):

O método de Thornthwaite (1948) utiliza a temperatura média diária do ar ($T_{med\ i}$), considerando um mês de 30 dias e 12 horas de fotoperíodo:

$$ETo_{Ti} = \frac{N_i}{12} \cdot \frac{1}{30} \cdot 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_{med\ i}}{I} \right)^a, \quad \text{sendo: } T_{med\ i} > 0^{\circ}\text{C}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \cdot T_m)^{1,514}, \quad \text{sendo: } T_m > 0^{\circ}\text{C}$$

Sendo: ETo_{Ti} – evapotranspiração de referência estimada com o método de Thornthwaite (1948) para o i -ésimo dia (mm dia^{-1}); N_i – fotoperíodo no i -ésimo dia (horas); $T_{med\ i}$ – temperatura média do ar no i -ésimo dia ($^{\circ}\text{C}$); a – função cúbica do índice de calor I da região (adimensional); I – índice de calor da região (adimensional); T_m – temperatura média normal do m -ésimo mês do ano ($^{\circ}\text{C}$).

A ETo diária obtida com os métodos alternativos e método padrão de Penman-Monteith foram comparados em análise de regressão linear e seu respectivo coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância “ d ” (Willmott et al., 1985), índice de desempenho “ c ” (Camargo & Sentelhas, 1997) e raiz quadrada média do erro (RMSE):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ETo_{alternativo\ i} - ETo_{PM\ i})^2}{\sum_{i=1}^n \left(\left| ETo_{alternativo\ i} - \overline{ETo_{PM}} \right| + \left| ETo_{PM\ i} - \overline{ETo_{PM}} \right| \right)^2} \right]$$

$$c = |R \cdot d|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (ETo_{alternativo\ i} - ETo_{PM\ i})^2}$$

Sendo: d – índice de concordância de Willmott et al. (1985) (adimensional); $ETo_{alternativo\ i}$ – evapotranspiração de referência estimada com o método alternativo, no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); $ETo_{PM\ i}$ – evapotranspiração de referência estimada com o método de Penman-Monteith, no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); $\overline{ETo_{PM}}$ – média da

evapotranspiração de referência estimada com o método de Penman-Monteith (mm dia^{-1}); n – número de observações; c – índice de desempenho proposto por Camargo & Sentelhas (1997) (adimensional); R – coeficiente de correlação obtido na análise de regressão linear (adimensional); $RMSE$ – raiz quadrada média do erro (mm dia^{-1}).

Os valores do índice “ c ” indicam o seguinte desempenho do modelo testado: “ótimo” (“ c ” $> 0,85$); “muito bom” ($0,76 \leq “c” \leq 0,85$); “bom” ($0,66 \leq “c” \leq 0,75$); “mediano” ($0,61 \leq “c” \leq 0,65$); “sofrível” ($0,51 \leq “c” \leq 0,60$); “mau” ($0,41 \leq “c” \leq 0,50$); e, “péssimo” (“ c ” $\leq 0,40$).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vários autores demonstraram a influência do tipo climático na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), bem como sobre o desempenho de métodos alternativos (Trajkovic & Kolakovic, 2009; Pandey et al., 2016). Desempenhos contrastantes entre os métodos alternativos para os tipos climáticos do Paraná também foram observados nas análises (Tabelas 1.1 e 1.2).

Em geral, os métodos de Hargreaves-Samani e Camargo apresentaram os melhores desempenhos para os climas Cfa e Cfb, e o método Camargo apresentou os menores erros ($RMSE$). Syperreck et al. (2008) avaliando métodos alternativos para uma única localidade do Paraná, com clima de Cfa, também encontraram melhores resultados para o método Hargreaves-Samani ($R = 0,86$, $d = 0,85$, $c = 0,73$), seguidos pelos métodos de Thornthwaite e Camargo. Camargo & Sentelhas (1997) comparando 20 métodos alternativos de estimativa da ET_o com medidas realizadas em evapotranspirômetros em São Paulo (Cfa), obtiveram melhores estimativas para os métodos de Camargo e Thornthwaite.

O uso da radiação solar em métodos alternativos é reconhecido na literatura, e geralmente proporciona bons resultados (Yoder et al., 2005; Irmak et al., 2006). Os métodos de Hargreaves-Samani e Camargo usam como variável de entrada radiação solar (Yan et al., 2012), e também resultaram nas melhores estimativas de ET_o nas estações estudadas.

TABELA 1.1 – COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R^2), CORRELAÇÃO (R), RAIZ QUADRADA MÉDIA DO ERRO (RMSE) E ÍNDICES “ d ” E “ c ” DE DESEMPENHO, OBTIDOS COM OS MÉTODOS ALTERNATIVOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ($ETo_{alternativo}$) EM RELAÇÃO AO PADRÃO (ETo_{PM}), PARA O TIPO CLIMÁTICO “Cfa”, NO PARANÁ, ENTRE 1986 E 2015

Parâmetros	Métodos de estimativa da ETo^*					
	PM	B	C	HS	L	T
----- Campo Mourão -----						
Média	3,14	4,07	2,84	4,08	2,69	1,50
Coeficiente linear (a)	—	−1,37	0,45	−0,24	−0,25	1,56
Coeficiente angular (b)	—	1,11	0,95	0,83	1,26	1,05
R^2	—	0,45	0,57	0,78	0,63	0,77
R	—	0,67	0,75	0,88	0,79	0,88
Índice “ d ”	—	0,88	0,93	0,92	0,92	0,76
Índice “ c ”	—	0,59	0,70	0,82	0,72	0,66
Desempenho	—	“Sofrível”	“Bom”	“Muito bom”	“Bom”	“Bom”
RMSE	—	1,35	0,91	1,15	0,94	1,76
----- Londrina -----						
Média	2,23	4,3	3,00	4,17	3,33	1,82
Coeficiente linear (a)	—	−1,33	0,27	−0,16	0,56	1,71
Coeficiente angular (b)	—	0,88	0,73	0,62	0,65	0,82
R^2	—	0,26	0,35	0,43	0,29	0,64
R	—	0,51	0,59	0,65	0,54	0,80
Índice “ d ”	—	0,74	0,63	0,60	0,66	0,62
Índice “ c ”	—	0,38	0,37	0,39	0,35	0,50
Desempenho	—	“Muito mau”	“Muito mau”	“Muito mau”	“Muito mau”	“Mau”
RMSE	—	2,17	1,23	2,06	1,33	1,57
----- Maringá -----						
Média	3,06	4,44	3,10	4,05	3,84	2,01
Coeficiente linear (a)	—	−1,63	0,44	−0,01	0,86	1,92
Coeficiente angular (b)	—	1,1	0,91	0,81	0,63	0,77
R^2	—	0,43	0,56	0,7	0,4	0,65
R	—	0,66	0,75	0,84	0,63	0,8
Índice “ d ”	—	0,88	0,69	0,72	0,68	0,62
Índice “ c ”	—	0,58	0,52	0,6	0,43	0,5
Desempenho	—	“Sofrível”	“Sofrível”	“Sofrível”	“Mau”	“Mau”
RMSE	—	1,52	0,86	1,08	1,24	1,65
----- Paranaguá -----						
Média	1,95	4,32	3	3,41	2,45	1,31
Coeficiente linear (a)	—	−1,63	0,16	0,07	−0,1	1,62
Coeficiente angular (b)	—	0,9	0,7	0,65	0,96	0,87
R^2	—	0,41	0,53	0,6	0,43	0,67
R	—	0,64	0,73	0,78	0,66	0,82
Índice “ d ”	—	0,74	0,76	0,74	0,74	0,58
Índice “ c ”	—	0,47	0,55	0,58	0,49	0,47
Desempenho	—	“Mau”	“Sofrível”	“Sofrível”	“Mau”	“Mau”
RMSE	—	2,20	1,07	1,39	0,80	1,60

FONTE: O autor (2018).

* PM – Penman-Monteith; B – Budyko; C – Camargo; HS – Hargreaves-Samani; L – Linacre; T – Thornthwaite.

** Coeficientes linear (a) e angular (b) da regressão linear, em que $ETo_{PM} = a + b \cdot ETo_{alternativo}$.

TABELA 2.2 – COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R^2), CORRELAÇÃO (R), RAIZ QUADRADA MÉDIA DO ERRO (RMSE) E ÍNDICES "d" E "c" DE DESEMPENHO, OBTIDOS COM OS MÉTODOS ALTERNATIVOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ($ETo_{alternativo}$) EM RELAÇÃO AO PADRÃO (ETo_{PM}), PARA O TIPO CLIMÁTICO "Cfb", NO PARANÁ, ENTRE 1986 E 2015

Parâmetros	Métodos de estimativa da ETo^*					
	<i>PM</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>HS</i>	<i>L</i>	<i>T</i>
----- Castro -----						
Média	2,86	3,41	2,36	3,63	2,27	0,93
Coeficiente linear (<i>a</i>)	—	−0,33	0,73	0,04	0,09	2,15
Coeficiente angular (<i>b</i>)	—	0,95	0,92	0,79	1,24	1,11
R^2	—	0,32	0,45	0,58	0,42	0,32
R	—	0,56	0,67	0,76	0,65	0,57
Índice "d"	—	0,76	0,72	0,78	0,68	0,51
Índice "c"	—	0,43	0,48	0,59	0,44	0,29
Desempenho	—	"Mau"	"Mau"	"Sofrível"	"Mau"	"Muito mau"
RMSE	—	1,21	1,13	1,17	1,21	2,49
----- Curitiba -----						
Média	2,67	3,48	2,42	3,46	2,5	1,06
Coeficiente linear (<i>a</i>)	—	−0,28	0,65	0,53	0,66	1,62
Coeficiente angular (<i>b</i>)	—	0,85	0,84	0,62	0,81	1,09
R^2	—	0,4	0,59	0,57	0,38	0,59
R	—	0,64	0,77	0,75	0,61	0,77
Índice "d"	—	0,88	0,63	0,62	0,55	0,48
Índice "c"	—	0,56	0,49	0,47	0,33	0,37
Desempenho	—	"Sofrível"	"Mau"	"Mau"	"Muito mau"	"Muito mau"
RMSE	—	1,16	0,73	1,16	0,87	1,85
----- Irati -----						
Média	2,30	3,46	2,43	3,6	2,45	1,09
Coeficiente linear (<i>a</i>)	—	−0,47	0,58	0,02	−0,21	1,56
Coeficiente angular (<i>b</i>)	—	0,93	0,89	0,75	1,17	1,22
R^2	—	0,38	0,53	0,7	0,63	0,58
R	—	0,61	0,73	0,84	0,79	0,76
Índice "d"	—	0,87	0,72	0,77	0,66	0,55
Índice "c"	—	0,53	0,52	0,64	0,52	0,42
Desempenho	—	"Sofrível"	"Sofrível"	"Mediano"	"Sofrível"	"Mau"
RMSE	—	1,21	0,90	1,15	0,75	1,96
----- Ivaí -----						
Média	3,12	3,65	2,55	3,82	2,60	1,27
Coeficiente linear (<i>a</i>)	—	−0,52	0,76	0,06	0,16	1,93
Coeficiente angular (<i>b</i>)	—	1,00	0,93	0,81	1,15	1,07
R^2	—	0,37	0,51	0,71	0,51	0,52
R	—	0,61	0,71	0,84	0,71	0,72
Índice "d"	—	0,74	0,71	0,78	0,64	0,56
Índice "c"	—	0,45	0,51	0,66	0,46	0,40
Desempenho	—	"Mau"	"Sofrível"	"Bom"	"Mau"	"Muito mau"
RMSE	—	1,17	1,1	1,02	1,09	2,21

FONTE: O autor (2018).

* *PM* – Penman-Monteith; *B* – Budyko; *C* – Camargo; *HS* – Hargreaves-Samani; *L* – Linacre; *T* – Thornthwaite.

** Coeficientes linear (*a*) e angular (*b*) da regressão linear, em que $ETo_{PM} = a + b \cdot ETo_{alternativo}$.

De acordo com Hupet & Vanclooster (2001), a radiação solar tem grande influência na *ET_o* em climas frios e úmidos, devido à menor magnitude e influência das demais variáveis climáticas, concordando com os resultados encontrados no presente trabalho. Souza et al. (2014) também concordam que o uso de radiação solar em métodos alternativos resulta em estimativas consistentes de *ET_o* para climas “quentes e secos” e climas “frios e úmidos”. No entanto, Gardiman Junior et al. (2012) consideraram que os métodos de estimativa que usam radiação solar são mais apropriados somente em tipos climáticos quentes e secos.

Conforme Souza et al. (2014), o método Hargreaves-Samani tende a apresentar melhor desempenho em regiões de clima quente, com altas temperaturas médias ao longo do ano, uma vez que o método baseia-se na temperatura média e temperatura diurna máxima.

O método de Linacre obteve melhor desempenho apenas em Campo Mourão (clima Cfa; “bom”), sendo que no resto dos locais obteve apenas desempenho entre “mau” e “sofrível”. O método foi desenvolvido a partir de dados obtidos de diferentes locais na África e América do Sul (Souza et al., 2014), sendo uma simplificação do modelo Penman (1948), que usa funções de temperatura do ar, como a diferença entre a temperatura média e a temperatura do ponto de orvalho.

Os métodos de Thornthwaite e Budyko não foram adequados para estimar a *ET_o* nos tipos climáticos estudados no Paraná, pois se baseiam apenas na temperatura do ar. Mendonça et al. (2003), Cavalcante Júnior et al. (2011) e Todorovic et al. (2013) observaram melhor ajuste dos métodos para climas quentes e secos, o que justifica seus baixos desempenhos nos climas frios e úmidos do Estado do Paraná.

1.4 CONCLUSÕES

O método de Hargreaves-Samani tem melhor desempenho entre os métodos testados para estimar a evapotranspiração de referência (*ET_o*) para os principais tipos climáticos do Estado do Paraná.

O método de Camargo fornece menores erros entre os valores padrão de *ET_o* (Penman-Monteith) e os valores estimados.

Os métodos de Thornwaite, Linacre e Budyko não são adequados para estimar a *ETo* em qualquer tipo climático do Estado do Paraná.

1.5 REFERÊNCIAS

- Alencar LP, Sedyama GC, Mantovani EC. Estimation of reference evapotranspiration (*ETo*) under FAO standards with missing climatic data in Minas Gerais, Brazil. *Engenharia Agrícola*. 2015;35(1): 39-50.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D. Crop evapotranspiration. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56; 1998.
- Alvares, CA, Stape JL, Sentelhas PJ, Gonçalves JLM., Sparovek G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 2013; 2:711-728.
- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: Institute of the American Society of Civil Engineers; 2005.
- Budyko MI. Climate and life. New York: Academic Press, 1974.
- Camargo AP. Balanço hídrico no estado de São Paulo. Campinas: IAC, 1971. 28p.
- Camargo AP, Sentelhas PC. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 1997;5(1):89-97.
- Cavalcante Junior EG, Oliveira AD, Almeida BM, Sobrinho JE. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semi-árido Nordeste. *Semina*. 2011;32:1699-1708.
- Chauhan S, Shrivastava RK. Performance evaluation of reference evapotranspiration estimation using climate based methods and artificial neural networks. *Water Resource Management*. 2009; 23(5):825-837.
- Gardiman Junior BS, Magalhães IAL, Cecilio RA. Comparação entre diferentes métodos de estimativas de evapotranspiração de referência (*ETo*) para Linhares-ES. *Nucleus*. 2012; 9(2):103-112. DOI: 10.3738/nucleus.v9i2.783.
- Hargreaves GH, Samani ZA. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering Agriculture*. 1985;1(2):96-99. DOI: 10.13031/2013.26773.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2005;25:1965-1978.
- Hupet F, Vanclooster M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*. 2001;243:192-204.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa/BDMEP. 2016. Disponível em: <<http://www.bdmpe.inmet.br/>>. Acesso em 22 jun. 2016.
- Irmak S, Payero JO, Martin DL, Irmak A, Howell TA. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2006;132:564–578.
- ITCG – Instituto de Terras Cartografias e Geociências. Mapa de clima do Estado do Paraná. Curitiba: ITCG, 2006.
- Köppen W. Das geographische system der klimate. *Handbuch der Klimatologie*. Gebruder Borntrager. 1936;1:01-44.

- Linacre ET. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*. 1977;18:409-424.
- Mendonça JC, Sousa EF, Bernardo S, Dias GP, Grippa S. Comparação de estimativa entre métodos de evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2003;7:276-279.
- Pandey KP, Dabral PP, Pandey V. Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *International Soil and Water Conservation Research*. 2016;4:56-67.
- Penman HL. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society*. 1948;193:120-145.
- Pereira AR, Vila Nova NA, Sedyama GC. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: ESALQ, 1997.
- Pereira LS, Allen LG, Smith M, Raes D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future. *Agricultural Water Management*. 2015;147:04-20.
- Silva RD, Silva MAA, Canteri MG, Rosisca JR, Vieira Junior NA. Reference evapotranspiration for Londrina, Paraná, Brazil: performance of different estimation methods. *Semina: Ciências Agrárias*. 2017;38(4/1):2363-2374.
- Souza JM, Pereira LR, Rafael AM, Silva LD, Reis EF, Bonomo R. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration in two locations of Espírito Santo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*. 2014;8(2):114-126.
- Syperreck VLG, Klosowski ES, Greco M, Furlanetto C. Avaliação de desempenho de modelos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2008;30:603-609.
- Thornthwaite CW. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 1948;38(1):55-94.
- Todorovic M, Karic B, Pereira LS. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology*. 2013;481:166-176.
- Trajkovic S, Kolakovic S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management*. 2009;23:3057-3067.
- Willmott CJ, Rowe CM, Mintz Y. Climatology of terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climatology*. 1985;5:589-606.
- Yan H, Wang SQ, Billesbach D, Oechel W, Zhang JH, Meyers T. Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model. *Remote Sensing of Environment*. 2012;124: 581–595.
- Yoder RE, Odhiambo LO, Wright WC. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applying Engineering Agriculture*. 2005;21:197-202.

2 PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PROVÁVEIS NO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar a evapotranspiração de referência (ET_o) e precipitação pluvial (P) para diferentes probabilidades de ocorrência no Estado do Paraná, para subsidiar planejamentos e estudos futuros na região. A série de dados climáticos (1980 a 2013; 34 anos) foi proveniente da Agência Nacional de Águas e Instituto Nacional de Meteorologia. Os dados climáticos (precipitação, temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa, velocidade do vento a 2 m de altura, brilho solar diário e radiação solar diária) foram espacializados com o melhor interpolador, obtido por validação cruzada, em *grid* regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, gerando 279 pontos para análise, cobrindo todo o Estado do Paraná. A ET_o foi calculada diariamente com o método de Penman-Monteith. Os dados diários de ET_o e P foram somados e agrupados em dez dias (decêndios), totalizando 37 decêndios por ano. Foram realizadas distribuições de frequência e aplicados testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade aos valores de ET_o e P , para realizar o ajustamento às funções densidade de probabilidade (fdp 's) (Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme) para cada localidade. Determinou-se os valores decendiais prováveis de P a 50, 75 e 90% de probabilidade ($P_{50\%}$, $P_{75\%}$, $P_{90\%}$), e ET_o a 50, 25 e 10% ($ET_{o50\%}$, $ET_{o25\%}$, $ET_{o10\%}$), respectivamente. Os valores decendiais prováveis foram interpolados por *krigagem* ordinária, utilizando-se *grid* de 1000 por 637 linhas. As fdp 's Gama e Exponencial foram as que melhor se ajustaram à precipitação provável, enquanto as fdp 's Gama e Normal foram melhores para ET_o provável. A P média total provável foi maior no litoral e sudeste, e houve crescimento na ET_o total média provável, independente do nível de probabilidade e estação do ano, da região sudeste para a noroeste do Estado do Paraná. A condição de maior restrição hídrica ($P_{90\%}$ vs $ET_{o10\%}$) revelou-se extremamente restritiva ao cultivo agrícola ao longo de todo o ano em todo o Estado.

Palavras-chave: Função densidade de probabilidade. Componentes hídricas. Espacialização. Decêndios.

ABSTRACT

We aimed to determine the reference evapotranspiration (ET_o) and precipitation (P) for different probabilities of occurrence in Paraná State, in order to support future planning and studies in the region. The series of climatic data (1980 to 2013; 34 years) came from the National Water Agency and National Institute of Meteorology. The climatic data (precipitation, maximum, minimum and average temperature, relative humidity, wind velocity at 2 m height, daily solar brightness and daily solar radiation) were spatialized with the best interpolator, obtained by cross-validation, in a regular grid of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, generating 279 points for analysis, covering the entire Paraná State. The ET_o was calculated daily by the Penman-Monteith method. The daily ET_o and P data were summed and grouped in ten days (deccennial), totaling 37 ten days periods in the year. Frequency distributions and Kolmogorov-Smirnov adhesion tests at 5% probability were applied to the ET_o and P values, to perform the adjustment to probability density functions (*pdf's*) (Exponential, Gamma, Normal, Triangular and Uniform) for each location. Probable values of P at 50, 75 and 90% probability ($P_{50\%}$, $P_{75\%}$, $P_{90\%}$), and ET_o at 50, 25 and 10% ($ET_{o50\%}$, $ET_{o25\%}$, $ET_{o10\%}$) were determined, respectively. The probable values were interpolated by ordinary kriging, using a grid of 1,000 by 637 lines. The *pdf's* Gamma and Exponential were the ones that best fit the probable precipitation, while *pdf's* Gamma and Normal were better for probable ET_o . The probable total average P was higher in the littoral and southeast, and there was a growth in the probable total average ET_o , independent of the probability level and season of the year, from the southeast region to the northwest of the Paraná State. The condition of greater water restriction ($P_{90\%}$ vs $ET_{o10\%}$) proved to be extremely restrictive to agricultural cultivation throughout the year in statewide.

Keywords: Probability density function. Water components. Spatialization. Ten days.

2.1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração de referência (ET_o) ou precipitação (P) provável refere-se à altura mínima de evapotranspiração ou chuva esperada em dado período do ano, para determinado nível de probabilidade. O estudo da tendência e distribuição da ET_o e P é importante para o entendimento e determinação de períodos críticos, sendo relevante no planejamento e manejo racional da produção agrícola (Ribeiro et al., 2013; Dias et al., 2015; Vicente-Serrano et al., 2015). Além disso, diversos autores recomendam a utilização da ET_o e P prováveis no dimensionamento de projetos agrícolas, uma vez que o uso de valores médios pode resultar em erros (Sampaio et al., 2006, Soccol et al., 2010, Silva et al., 2015).

Estudos probabilísticos da distribuição da ET_o e P demonstram que suas ocorrências consistem em fenômenos aleatórios influenciados pela localização geográfica. Por isso, muitos trabalhos se limitam a estudar pequenas regiões, como cidades, o que não contribui para macroplanejamentos. Essa situação vem ocorrendo no Estado do Paraná. Outra dificuldade em estudar as componentes hídricas em macro regiões refere-se à obtenção de séries consistentes e longas de dados climáticos, sem falhas ou oscilação no número de anos, e que tenham o mesmo padrão instrumental de medida (Souza et al., 2013; Jerszurki et al., 2015a; Jerszurki et al., 2015b; Paulo et al., 2016). Dessa forma, estudos em grandes regiões que minimizem os problemas mencionados devem ser priorizados e valorizados (Stagge et al., 2015; Vicente-Serrano et al., 2015).

Outra dificuldade dos estudos consiste em estabelecer os níveis de probabilidade a serem utilizados. Baseando-se na ET_o , para que haja minimização dos riscos e elaboração adequado dos projetos agrícolas, recomenda-se valores com 25% de probabilidade de serem igualados ou superados, o que corresponde a um período de retorno de 1,33 anos (Doorenbos & Pruitt, 1977; Vicente-Serrano et al., 2015). Para a P a recomendação é que não se deve trabalhar com probabilidades inferiores a 75% ou 80%, pois o nível de 75% representa a quantidade mínima de P que se espera ocorrer em três de cada quatro anos (Ribeiro et al., 2013; Souza et al., 2013). Jensen (1974) comenta que os níveis mais elevados de probabilidade (80% a 90%) são selecionados para culturas de grande valor econômico e condições reduzidas de água disponível no solo. Doorenbos & Pruitt (1977) consideram que os níveis de probabilidade devem ficar entre 75% e

80% na maioria das regiões irrigadas. De acordo com Wang et al. (2012), nas condições de irrigação suplementar, dificilmente justifica-se, economicamente, adotar níveis superiores a 90%, sendo normalmente utilizados níveis que variam entre 50% a 75%.

Diante das considerações dispostas anteriormente, teve-se por objetivo no presente trabalho determinar a P e ET_o para diferentes probabilidades de ocorrência no Estado do Paraná, para subsidiar planejamentos e estudos futuros na região.

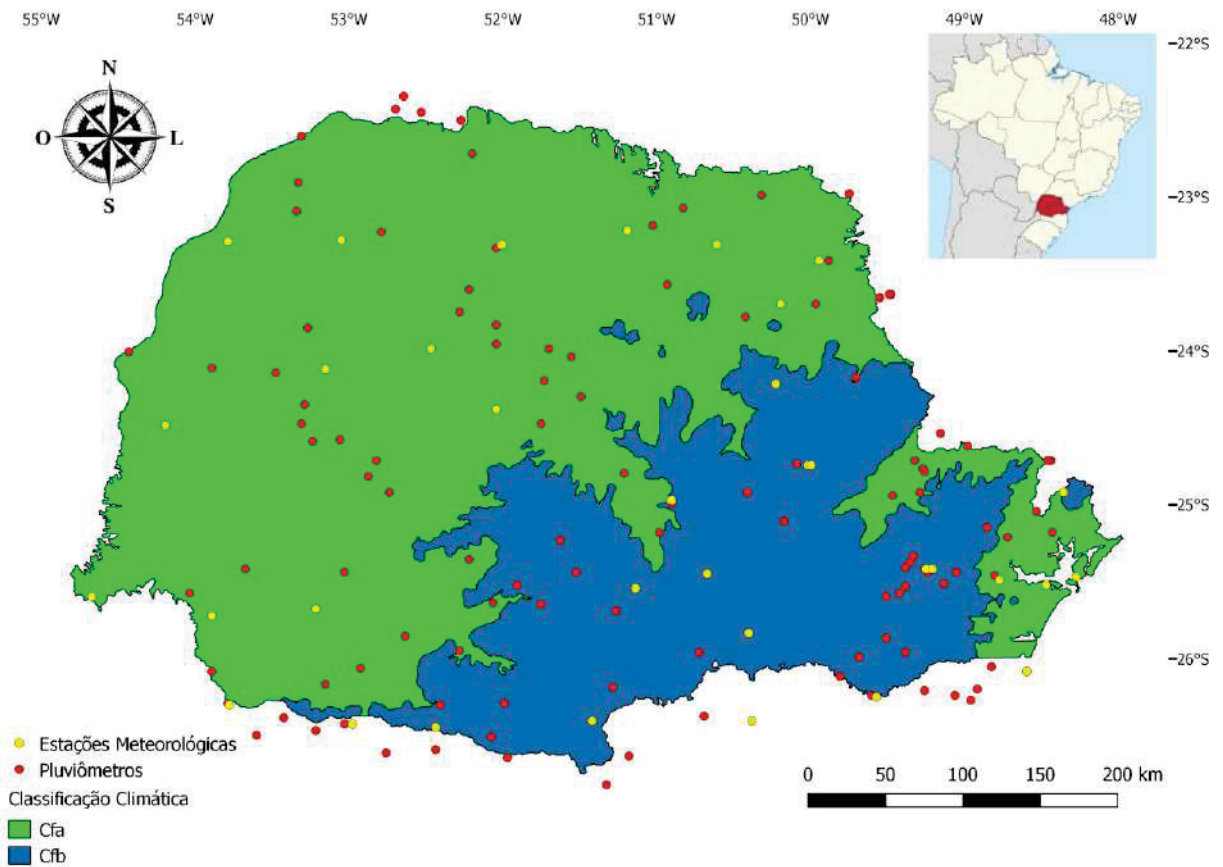
2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos

O Estado do Paraná está localizado na região Sul do Brasil e sua área é de 199.307,922 km². No Estado predominam dois tipos climáticos principais, de acordo com a classificação de Köppen: Cfa e Cfb (Maack, 2012). O clima Cfa, subtropical tem boa distribuição de chuvas, temperatura média anual de 19 °C e pluviosidade de 1500 mm anuais. O clima Cfb, subtropical tem boa distribuição de chuvas durante o ano e verões amenos. A média anual das temperaturas é de 17 °C e a pluviosidade é superior a 1200 mm anuais (Alvares et al., 2013) (Figura 2.1).

O conjunto de dados meteorológicos incluiu dados observados recolhidos diariamente a partir de pluviômetros (em média 151 unidades), bem como estações meteorológicas convencionais e automáticas (em média 38 unidades), no período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de Dezembro 2013 (34 anos) (Figura 2.1). As fontes dos dados foram o “Instituto Nacional de Meteorologia” (INMET) e “Agência Nacional de Águas” (ANA). Os dados da ANA foram limitados à precipitação pluviométrica (P). Os dados do INMET foram constituídos de: temperaturas máxima (T_{max} ; °C), mínima (T_{min} ; °C) e média (T_{med} ; °C) do ar, umidade relativa do ar (UR ; %), velocidade do vento a 2 m de altura (U_2 , m s⁻¹), precipitação pluviométrica (P ; mm), brilho solar diário (n ; horas) de estações meteorológicas convencionais, e radiação solar diária (R_s , MJ m⁻²) a partir de estações automáticas. Não foram observados dados das estações meteorológicas com coordenadas duplicadas. Assim, não foram removidas quaisquer medidas de pluviômetros ou dados das estações meteorológicas do conjunto de dados.

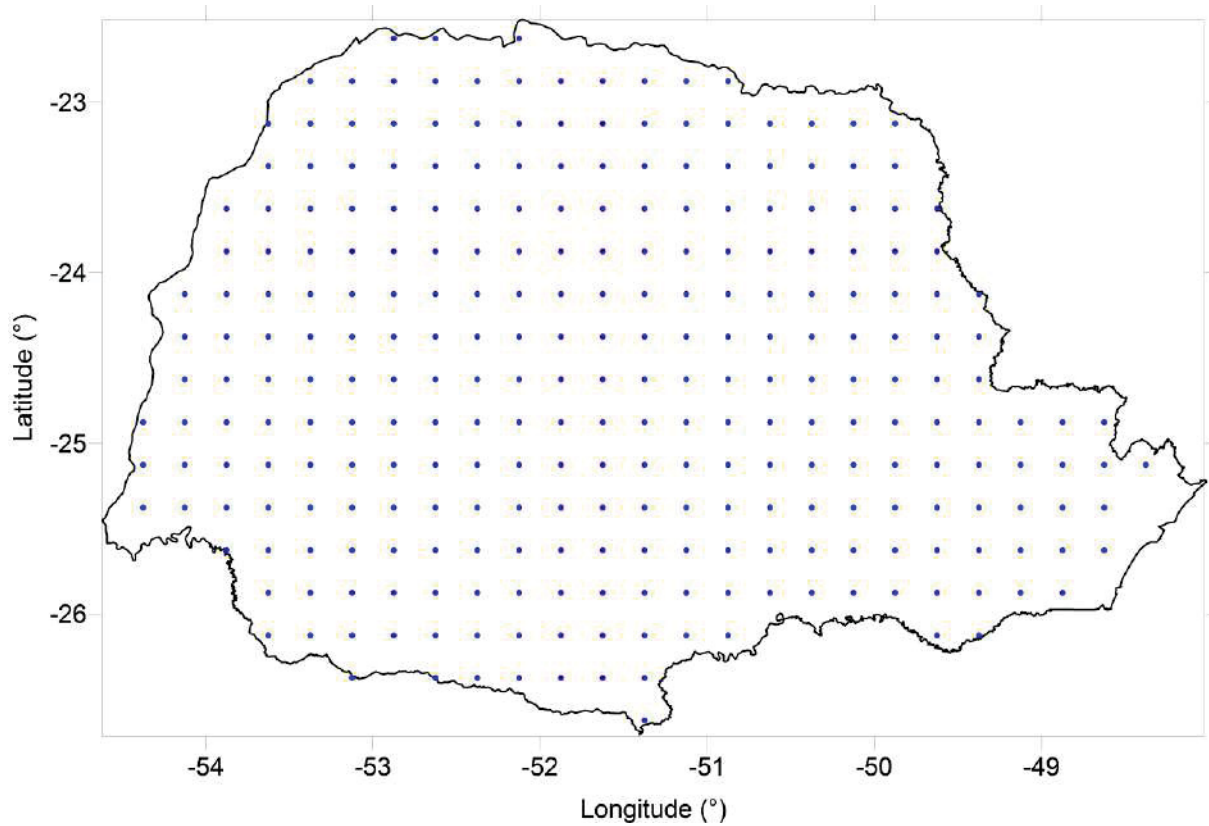
FIGURA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN PARA O ESTADO DO PARANÁ E PLUVIÔMETROS E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS NO PRESENTE ESTUDO



FONTE: adaptado de ITCG (2006); O autor (2018).

Vários interpoladores foram testados para espacializar os dados meteorológicos: ponderação da distância inversa; *krigagem* ordinária; *spline*; interpolação natural; média aritmética. O melhor interpolador foi obtido por meio de validação cruzada, e os dados meteorológicos foram espacializados em *grid* regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, cobrindo todo o Estado do Paraná (Xavier et al., 2016). Como resultado obteve-se os dados meteorológicos (P , $T_{máx}$, $T_{mín}$, T_{med} , UR , U_2 , n , Rs) diários (34 anos) para o *grid* regular (Figura 2.2).

FIGURA 2.2 – GRID REGULAR DE 0,25° X 0,25°, CONTENDO OS 279 PONTOS NO ESTADO DO PARANÁ, EM QUE FORAM ANALISADOS OS VALORES DIÁRIOS DE ET_o E P , AGRUPADOS EM DECÊNDIOS



FONTE: O autor (2018).

A partir dos dados climáticos espacializados, a ET_o foi calculada diariamente com o método de Penman-Monteith adaptado (ASCE-EWRI, 2005) (Apêndice 2):

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{C_n}{(T_{med} + 273)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + C_d \cdot u_2)}$$

Sendo: ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n – radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G – balanço do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); γ_{psy} – constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T – temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s^{-1}); e_s – pressão de saturação de vapor (kPa); e_a – pressão atual do vapor (kPa); C_n – constante relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados, sendo considerado igual a 900 para a grama batatais (adimensional); C_d – constante relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados, sendo considerada igual a 0,34 para a grama batatais (adimensional).

2.2.2 Probabilidade de ocorrência de precipitação e evapotranspiração de referência

Considerando os procedimentos metodológicos de Souza et al. (2013), foram realizados os seguintes passos:

- a) Agrupamento dos valores diários de P e ET_o em períodos de dez dias (decêndios);
- b) Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados das séries observadas;
- c) Cálculo dos parâmetros estatísticos das funções densidade de probabilidade (fdp) Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme (Apêndice 3), com as séries de valores decendiais;
- d) Verificação da aderência dos valores decendiais às cinco fdp 's com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade;
- e) Escolha da fdp que melhor se ajustou a cada decêndio observado;
- f) Determinação dos valores prováveis com diferentes níveis de probabilidade de ocorrência.

Os valores diários P e ET_o foram organizados em 37 decêndios por ano. O trigésimo sétimo decêndio de cada ano foi composto pelos cinco ou seis (ano bissexto) últimos dias do ano. No caso da P , os dados diários foram tabulados e agrupados, separando os decêndios com valor igual a zero dos diferente de zero. Para evitar inconsistências na estimativa dos parâmetros das fdp 's utilizadas, os decêndios com valor inferior a 1 mm foram considerados iguais a zero.

Foram consideradas as fdp 's Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme (Apêndice 3). As fdp 's foram escolhidas baseando-se na aderência já obtida em regiões semelhantes (Sampaio et al., 2006; Souza et al., 2013) e nas proposições de autores para análise dos fenômenos em áreas extensas, utilizando séries temporais longas (Farahmand & Aghakouchak, 2015).

Os parâmetros estatísticos determinados foram: alfa e beta, para a distribuição Gama; média e desvio padrão, para a Normal; maior valor, menor valor e moda, para a Triangular; média, para a Exponencial; e maior e menor valor, para a Uniforme (Assis et al., 1996; Bussab & Morettin, 2010).

A aderência dos valores decendiais às fdp 's foi obtida por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. O teste avalia por meio do valor D_{max} ,

o ajuste entre a distribuição de frequência acumulada teórica $F'(x)$ e outra, $F(x)$, proveniente dos dados amostrados.

$$D_{max} = \text{Max } |F(x) - F'(x)|$$

Sendo: D_{max} – valor crítico para a estatística de Kolmogorov-Smirnov; $F(x)$ – função de distribuição de probabilidade teórica; $F'(x)$ – função de distribuição de probabilidade observada.

Para a condição “ D_{max} calculado < D_{max} tabelado” aceita-se a hipótese de que os valores da amostra ajustam-se bem à distribuição de probabilidade a 5% de significância, caso contrário, a hipótese é rejeitada.

O valor de D_{max} tabelado foi estimado utilizando as seguintes equações, conforme recomendações de Assis et al. (1996) e Souza et al. (2013):

$$D_{max} = 0,971 - 0,2388 \ln N \quad \text{Para } N < 16$$

$$D_{max} = \frac{1,37}{\sqrt{N}} \quad \text{Para } N \geq 16$$

Sendo: D_{max} – valor crítico D_{max} da estatística de Kolmogorov-Smirnov; N – número de elementos da amostra (adimensional).

Como algumas das fdp 's analisadas não admitem valores nulos, adotou-se o conceito de distribuição mista (Assis, 1996):

$$F(p) = P_o + (1 - P_o) \cdot D(p)$$

Sendo: $F(p)$ – função cumulativa de probabilidade da distribuição mista (%); P_o – probabilidade de ocorrência de decêndios com valor igual a zero (%) ou com valores menores que 1 mm; $D(p)$ – probabilidade estimada com a distribuição cumulativa teórica de melhor ajuste, cujos parâmetros foram determinados na ausência de decêndios com valor igual a zero (%).

Depois de testada a aderência da fdp que melhor se ajustou à P e ET_o , em cada decêndio, determinou-se os valores decendiais prováveis de precipitação, a 50, 75 e 90% de probabilidade ($P_{50\%}$, $P_{75\%}$, $P_{90\%}$), respectivamente, bem como, de ET_o , a 50, 25 e 10% de probabilidade ($ET_{o50\%}$, $ET_{o25\%}$, $ET_{o10\%}$), respectivamente, para cada localidade do *grid* regular (Figura 2.2):

$$P_{50\%} = P(P_{50\%} \in P \mid P_i \geq P_{50\%}) = 50\%$$

$$P_{75\%} = P(P_{75\%} \in P \mid P_i \geq P_{75\%}) = 75\%$$

$$P_{90\%} = P(P_{90\%} \in P \mid P_i \geq P_{90\%}) = 90\%$$

$$ETo_{10\%} = P(ETo_{10\%} \in ETo \mid ETo_i \geq ETo_{10\%}) = 10\%$$

$$ETo_{25\%} = P(ETo_{25\%} \in ETo \mid ETo_i \geq ETo_{25\%}) = 25\%$$

$$ETo_{50\%} = P(ETo_{50\%} \in ETo \mid ETo_i \geq ETo_{50\%}) = 50\%$$

Logo, para cada decêndio, a $P_{75\%}$ refere-se ao valor de P_i que tenha 75% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da precipitação P_i ocorrer três vezes a cada quatro anos ou com tempo de retorno $T = 1,33$ anos, em média. Para cada decêndio, a $ETo_{25\%}$ refere-se ao valor de evapotranspiração ETo_i que tenha 25% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da evapotranspiração ETo_i ocorrer uma vez a cada quatro anos ou com tempo de retorno $T = 4$ anos, em média.

2.2.3 Espacialização dos valores prováveis para o Estado do Paraná

Com os valores decendiais prováveis calculados foram gerados mapas de ETo e P prováveis para todo o Estado do Paraná. Os mapas foram gerados a partir da interpolação dos dados prováveis obtidos de ETo e P , com o programa Surfer 8.0. O método empregado para a interpolação dos dados foi a *krigagem* ordinária, utilizando *grid* de 1000 por 637 linhas.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Funções densidade de probabilidade (*fdp*)

Várias *fdp*'s têm sido utilizadas para estudar a ETo e P , apresentando variabilidade quanto à adequação às séries históricas. As *fdp*'s Gama e Exponencial se ajustaram melhor (aproximadamente 85%) às séries históricas de P , enquanto Gama e Normal (aproximadamente 92%) para ETo (Tabela 2.1).

TABELA 2.1 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (N – NORMAL; G – GAMA; T – TRIANGULAR; E – EXPONENCIAL; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA PRECIPITAÇÃO (P) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o), PARA O ESTADO DO PARANÁ

Decêndios	----- Melhor ajuste para P -----					----- Melhor ajuste para ET_o -----				
	N	G	T	E	U	N	G	T	E	U
1	30	222	3	24	0	211	24	44	0	0
2	109	123	22	11	14	92	166	12	0	9
3	27	210	8	34	0	141	99	36	0	3
4	99	161	11	2	6	87	137	55	0	0
5	76	184	9	8	2	68	191	16	0	4
6	89	168	10	4	8	174	74	29	0	2
7	43	181	8	47	0	151	118	8	0	2
8	11	198	5	63	2	204	58	17	0	0
9	15	136	14	112	2	41	131	58	0	49
10	29	201	5	44	0	190	76	13	0	0
11	58	151	41	19	10	75	202	2	0	0
12	1	135	0	143	0	114	155	10	0	0
13	2	124	4	149	0	83	167	6	0	23
14	7	117	3	152	0	200	64	7	0	8
15	8	178	5	88	0	95	178	6	0	0
16	2	208	0	69	0	117	161	1	0	0
17	13	151	6	109	0	59	203	11	0	6
18	0	169	0	110	0	124	133	20	0	2
19	2	155	0	122	0	58	208	13	0	0
20	0	119	1	159	0	22	250	7	0	0
21	51	129	11	82	6	160	105	1	0	13
22	5	177	1	96	0	32	245	2	0	0
23	0	180	0	99	0	28	249	2	0	0
24	2	136	2	139	0	169	48	62	0	0
25	14	132	0	133	0	150	89	9	0	31
26	61	129	21	59	9	71	184	21	0	3
27	31	215	6	26	1	170	93	12	0	4
28	5	135	2	137	0	82	142	15	0	40
29	48	185	11	34	1	147	115	17	0	0
30	50	184	12	33	0	190	82	3	0	4
31	132	120	17	3	7	136	130	13	0	0
32	43	175	28	31	2	44	223	12	0	0
33	21	231	5	22	0	212	13	54	0	0
34	39	192	13	35	0	170	91	18	0	0
35	50	192	13	23	1	155	96	2	0	26
36	38	181	1	59	0	121	150	4	0	4
37	4	185	5	85	0	96	179	4	0	0
Soma	1215	6169	303	2565	71	4439	5029	622	0	233
Porcentagem (%)	11,8	59,8	2,9	24,8	0,7	43,0	48,7	6,0	0,0	2,3

FONTE: O autor (2018).

Resultados semelhantes para P foram encontrados por Sampaio et al. (2006), que analisaram a $P_{75\%}$ mensal para o Paraná, e Souza et al. (2013), para valores decendiais em várias regiões brasileiras, bem como por Paulo et al. (2016) e Stagge et al. (2015), que testaram as funções Gama, Gumbel, Logística, Log-Logística, Lognormal, Normal e Weibull para toda a Europa.

Muitos estudos demonstraram que a *fdp* Gama é a que melhor se aplica aos estudos envolvendo chuva provável (Ribeiro et al., 2013; Stagge et al., 2015; Paulo et al., 2016). Segundo Dale (1968), a *fdp* Gama possui bom ajuste para variáveis contínuas que tenham limite inferior igual a zero e não possuam limite superior, sendo por isso largamente utilizada para o estudo de séries históricas de precipitação. No entanto, Souza et al. (2013), Jerszurki et al. (2015a) e Jerszurki et al. (2015b) verificaram a aderência de outras *fdp*'s, principalmente quando a série histórica de dados diários de chuva (extensa ou curta) apresenta poucos registros com precipitação superior a 1 mm no período, como ocorre em períodos secos e verânicos. Isso pode ter ocorrido em todo o Paraná, pois o Estado teve P média alta (1799 mm ano⁻¹), mas houve *fdp*'s não usuais (Triangular, Uniforme) que tiveram bom ajuste, apesar da pouca expressão percentual em relação ao total (Tabela 2.1). As *fdp*'s Normal e Exponencial também foram antagônicas, visto que nos períodos de pouca chuva (decêdio 12 ao 25; período de outono e inverno), muitos dias tiveram $P = 0$, e o ajuste à Normal foi menor.

Para Pruitt et al. (1972), as *fdp*'s mais utilizadas para o ajuste da *ETo* são a Normal, Gama, Beta e Gumbel. Para Silva et al. (2015), Gama e Normal são as únicas *fdp*'s que merecem destaque, sobretudo no dimensionamento de sistemas de irrigação. Tais informações estão de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho. Nas análises realizadas, não foram observados nenhum ajuste à distribuição Exponencial, devido à natureza do fenômeno da evapotranspiração.

O êxito em obter parâmetros das *fdp*'s de melhor ajuste para os 37 decêndios do ano, em todo o território paranaense (Tabela 2.1), foi algo muito bom e promissor, pois os resultados têm uma série de aplicações voltadas ao planejamento da agricultura. Os parâmetros obtidos podem servir de base para a realização de zoneamentos de risco agroclimáticos para todo o Estado do Paraná (Ribeiro et al., 2013; Souza et al., 2013; Silva et al., 2015).

2.3.2 Funções densidade de probabilidade (*fdp*)

Os valores prováveis de precipitação ($P_{50\%}$, $P_{75\%}$, $P_{90\%}$) e evapotranspiração de referência ($ETo_{50\%}$, $ETo_{25\%}$, $ETo_{10\%}$) para cada decêdio do ano estão disponíveis no Apêndice 4.

O valor médio da P diminuiu substancialmente à medida que se adotou probabilidade mais restritiva, enquanto na ETo esse aspecto não foi observado (Tabela 2.2).

TABELA 2.2 – MÉDIAS DECENDIAIS DA PRECIPITAÇÃO (P) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETo) (mm decêndio⁻¹) PROVÁVEIS NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	$P_{média}$	$P_{50\%}$	$P_{75\%}$	$P_{90\%}$	$ETo_{média}$	$ETo_{50\%}$	$ETo_{25\%}$	$ETo_{10\%}$
1	57,20	48,9	28,4	15,3	42,34	42,4	46,7	50,5
2	69,69	62,5	33,7	13,5	41,39	41,2	45,4	49,3
3	64,16	52,6	28,4	13,9	40,05	40,0	43,7	46,9
4	61,46	54,2	29,9	11,7	40,14	39,8	43,9	47,7
5	65,47	58,5	34,9	18,3	37,85	37,7	41,3	44,7
6	55,72	51,0	31,3	17,0	37,28	37,2	40,4	43,2
7	40,86	32,9	16,8	6,9	38,02	37,9	41,4	44,5
8	45,40	36,2	19,2	9,4	34,71	34,7	37,9	40,7
9	44,32	30,6	12,2	2,9	33,08	32,8	36,3	39,2
10	34,38	26,1	12,2	4,1	31,21	31,2	33,5	35,6
11	46,55	36,7	17,1	3,9	28,07	27,9	30,9	33,8
12	52,95	29,7	8,2	0,5	24,84	24,7	27,5	30,0
13	39,22	21,1	5,0	0,2	22,37	22,3	24,6	26,8
14	57,50	33,7	9,6	0,7	19,46	19,4	21,4	23,2
15	52,79	34,4	12,6	1,9	18,10	18,0	19,9	21,7
16	37,90	24,2	8,8	1,9	16,86	16,8	18,8	20,7
17	45,78	27,1	7,7	1,0	16,84	16,7	18,8	20,7
18	54,65	31,0	8,9	1,1	16,27	16,2	18,0	19,8
19	38,52	22,9	7,1	0,8	17,82	17,6	20,0	22,2
20	41,68	21,5	4,8	0,2	18,40	18,2	20,6	23,0
21	33,35	19,6	5,2	0,5	20,13	20,0	22,6	24,8
22	33,77	13,9	2,3	0,1	22,06	21,9	24,5	27,0
23	33,55	11,3	1,4	0,1	24,79	24,5	27,9	31,2
24	38,71	12,0	1,0	0,1	27,13	27,2	30,5	33,4
25	39,05	19,7	3,9	0,2	29,40	29,3	33,1	36,5
26	47,47	31,8	8,7	0,6	30,45	30,1	34,7	39,0
27	56,42	43,8	21,1	7,1	30,60	30,5	33,9	36,9
28	58,33	41,4	18,0	6,3	32,13	31,9	36,1	39,7
29	59,43	49,6	26,9	12,3	34,59	34,5	37,4	40,1
30	57,16	48,8	27,2	13,3	36,44	36,4	39,8	42,8
31	49,79	45,4	26,1	11,3	39,39	39,3	42,6	45,6
32	51,16	42,0	21,6	8,8	40,87	40,6	44,7	48,5
33	43,27	34,3	17,4	7,2	43,03	43,2	46,7	49,8
34	50,34	40,6	20,9	8,9	43,42	43,4	47,2	50,8
35	58,17	50,0	28,8	14,4	41,55	41,5	45,0	48,1
36	50,40	40,4	20,8	9,2	43,42	43,3	47,1	50,6
37	33,35	21,9	8,5	1,6	21,86	21,7	24,5	27,2
Média	48,65	35,2	16,1	6,1	30,71	30,6	33,8	36,7
Soma	1799,92	1302,5	596,4	226,8	1136,39	1131,9	1249,2	1356,3

FONTE: O autor (2018).

Em média, a única condição testada em que não proporcionou déficit hídrico ($P > ETo$) foi na probabilidade de 50%. Mesmo assim, ainda houve decêndios em que a $P_{50\%}$ foi menor que a $ETo_{50\%}$. Muitos autores afirmam que a $P_{50\%}$ não deve ser utilizada em planejamentos agrícolas e dimensionamento de sistemas de irrigação,

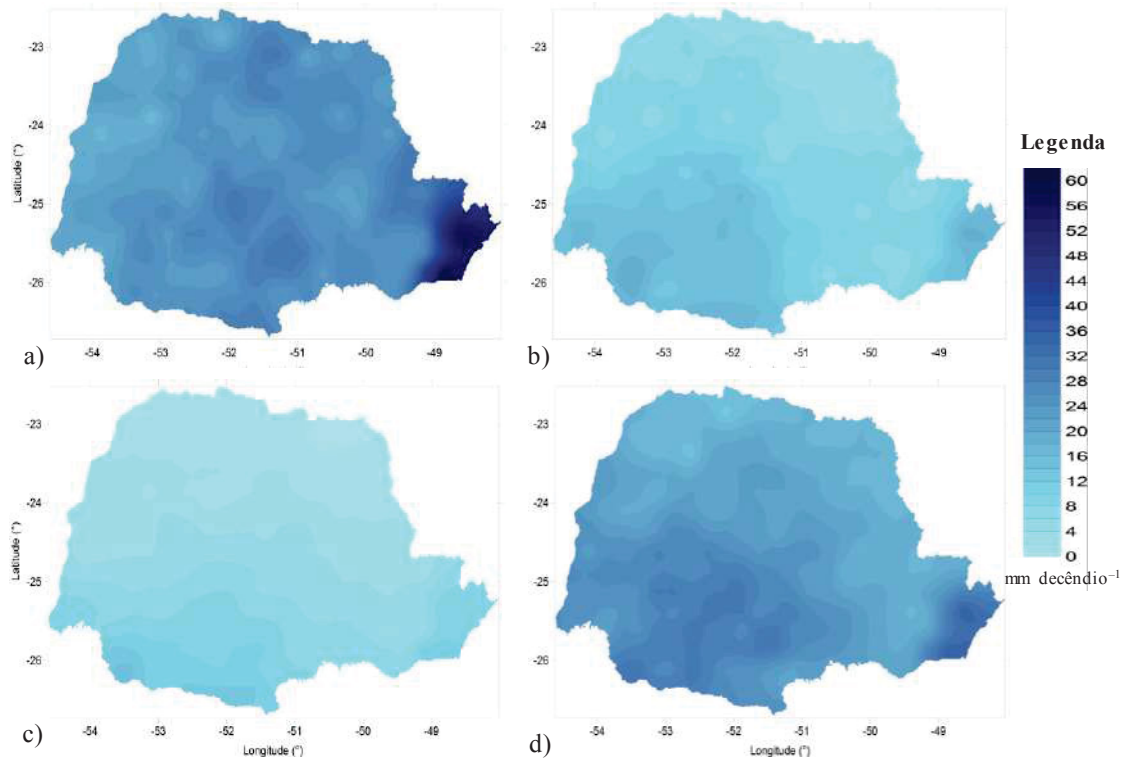
pois esta condição pode gerar perdas econômicas substanciais em detrimento da queda na produtividade, por causa do déficit hídrico (Ribeiro et al., 2013; Souza et al., 2013; Silva et al., 2015; Vicente-Serrano et al., 2015).

A P e ET_o médias nem sempre foram iguais aos valores da $P_{50\%}$ e $ET_{r50\%}$, respectivamente, principalmente quando as duas componentes se ajustaram melhor a uma função densidade de probabilidade (fdp) diferente da Normal (Tabela 2.2). Esse aspecto é muito importante, visto que são casos em que a média não reflete o valor provável a 50% de probabilidade. O ajustamento a outras fdp 's, diferente da Normal, nessa situação possibilita a obtenção de valores prováveis mais confiáveis.

A condição de $P_{90\%}$ revelou-se extremamente restritiva ao cultivo agrícola. No período de outono e inverno (decêndios 12 ao 26; 140 dias) verificou-se $P < 2$ mm decêndio⁻¹. De acordo com Wang et al. (2012), nas condições de dimensionamento de sistemas de irrigação dificilmente justifica-se economicamente adotar a $P_{90\%}$. A combinação intermediária ($P_{75\%} - ET_{o25\%}$), em média, também revelou condição restritiva, sendo que o consumo hídrico foi mais que o dobro superior à reposição de água no sistema. Essa situação gera alertas, no sentido de estudar mais profundamente as componentes hídricas ao longo do ano e o local onde elas ocorrem no Estado do Paraná.

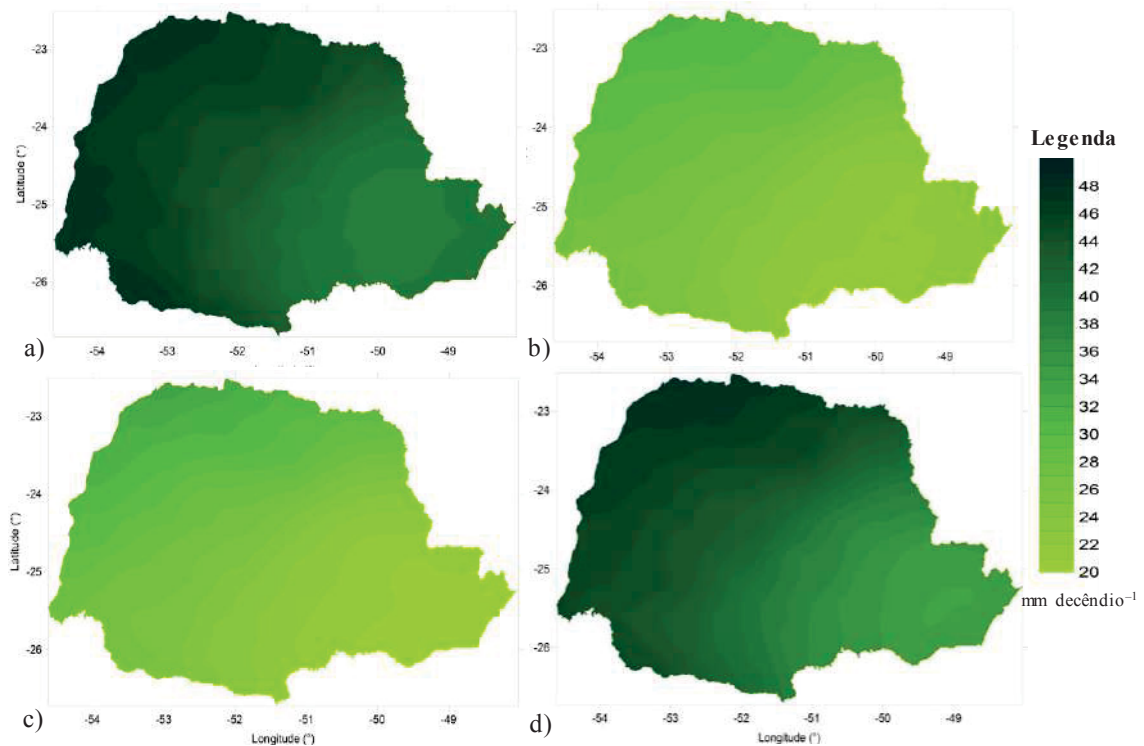
A P média provável foi maior no litoral e sudoeste do Estado do Paraná, independente da probabilidade (Figura 2.3). Essas regiões possuem menores altitudes no relevo do Estado, e geralmente por causa do tipo climático (Cfb) têm tendência de chover mais (Alvares et al., 2013). Houve crescimento nos valores (mm decêndio⁻¹) da ET_o total média provável, independente do nível de probabilidade, da região sudeste para a noroeste do Estado (Figura 2.4).

FIGURA 2.3 – PRECIPITAÇÃO DECENDIAL MÉDIA PROVÁVEL A 75% ($P_{75\%}$; mm decêndio⁻¹) NO ESTADO DO PARANÁ, NAS ESTAÇÕES: a) VERÃO; b) OUTONO; c) INVERNO; E, d) PRIMAVERA



FONTE: O autor (2018).

FIGURA 2.4 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DECENDIAL MÉDIA PROVÁVEL A 25% ($ET_{o25\%}$; mm decêndio⁻¹) NO ESTADO DO PARANÁ, NAS ESTAÇÕES: a) VERÃO; b) OUTONO; c) INVERNO; E, d) PRIMAVERA.



FONTE: O autor (2018).

A tendência da ET_o no Paraná teve alta correspondência com sua classificação climática (Figura 2.1). Isso ocorre porque do sudeste para noroeste a temperatura tende a aumentar, mas sobretudo aumenta a amplitude térmica, fazendo com que haja grande déficit de pressão de vapor, aumentando a ET_o (Allen et al., 1998; Jerszurki et al., 2017). Os menores valores de ET_o ocorreram no litoral e na região de Curitiba (sudeste), visto que nestas localidades a velocidade do vento (u_2) foi menor e a umidade relativa (UR) foi maior, ao longo de todo o ano. Essa combinação gera baixo déficit de pressão de vapor, o que diminuiu a demanda evapotranspirativa na interface planta-atmosfera. Além disso, outro fator que pode ter influenciado é a radiação solar, que é menor no sudeste em relação ao nordeste do Estado (Dias et al., 2015).

2.4 CONCLUSÕES

As funções densidade de probabilidade (f_{dp} 's) Gama e Exponencial foram as que melhor se ajustaram aos valores decendiais de precipitação, enquanto as f_{dp} 's Gama e Normal ajustaram-se melhor à evapotranspiração de referência (ET_o);

A precipitação provável (50%, 75% ou 90%) foi maior no litoral e sudeste. O crescimento na ET_o , independente do nível de probabilidade e estação do ano, ocorre da região sudeste para a noroeste do Estado do Paraná.

2.5 REFERÊNCIAS

- Allen RG, Pereira LS, Raes D. Crop evapotranspiration. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56, 1998.
- Alvares, CA, Stape JL, Sentelhas PJ, Gonçalves JLM., Sparovek G. Koppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift. 2013; 2:711-728.
- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: Institute of the American Society of Civil Engineers; 2005.
- Assis FN, Arruda HV, Pereira AR. Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática. Pelotas: Ed. da UFPel, 1996. 161 p.
- Bussab WO, Morettin PA. Estatística básica. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540p.
- Dale RF. Applied Climatology. Indiana: Purdue University, 1968, 125p.
- Dias LCP, Macedo MN, Costa MH, Coe MT, Neill C. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. Journal of Hydrology: Regional Studies. 2015;4(B):108-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.05.010>.

- Doorenbos J, Pruitt WO. Crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 1977. 144p.
- Farahmand A, Aghakouchak A. A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources*. 2015;76:140-145.
- ITCG – Instituto de Terras Cartografias e Geociências. Mapa de clima do Estado do Paraná. Curitiba: ITCG, 2006.
- Jensen ME. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York: ASCE, 1974. 215p.
- Jerszurki D, Souza JLM, Evangelista AWP. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba-PR. *Revista Brasileira de Biometria*. 2015a;33(2):118-129.
- Jerszurki D, Souza JLM, Evangelista AWP. Distribuição de probabilidade e movimento temporal da precipitação na região de Telêmaco Borba, Paraná. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 2015b;10(1):110-116.
- Jerszurki D, Souza JLM, Silva LCR. Expanding the geography of evapotranspiration: an improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. *PLoS ONE*. 2017;12(6):01-19.
- Maack R. Geografia física do Estado do Paraná. 4th ed. Curitiba: IBPT; 2012.
- Paulo A, Martins D, Pereira LS. Influence of precipitation changes on the SPI and related drought severity: an analysis using long-term data series. *Water Resource Management*. 2016;30:5737-5757.
- Pruitt WO, Oettingen SV, Morgan DL. Central California evapotranspiration frequencies. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 1972;98:177-184.
- Ribeiro BT, Ferreira Junior DC, Silva CR. Ten-day probable rainfall for Uberlândia, Minas Gerais State, Brazil. *Bioscience Journal*. 2013;29(3):536-542.
- Sampaio SC, Longo AJ, Queiroz MMF, Gomes BM, Villas Boas MA, Suszek M. Estimativa e distribuição da precipitação mensal provável no Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Human and Social Sciences*. 2006;28:267-272.
- Silva AO, Correia JS, Bassoi LH, Teixeira AHC. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, PE. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*. 2015;9(1):30-38.
- Soccol, O. J.; Cardoso, C. O.; Miquelluti, D. J. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2010;14:569-574.
- Souza JLM. Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR; 2013.
- Souza JLM, Jerszurki D, Damazio EC. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2013;48(7):693-702.
- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Loonc AFV, Stahl K. Candidate distributions for climatological drought indices. *International Journal of Climatology*. 2015;35:4027-4040.
- Vicente-Serrano SM, Schrier GV, Beguería S, Azorin-Molina C, Lopez-Moreno JL. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology*. 2015;526:42-54.
- Wang P, Song X, Han D, Zhang Y, Zhang B. Determination of evaporation, transpiration and deep percolation of summer corn and winter wheat after irrigation. *Agricultural Water Management*. 2012;105:32-37.
- Xavier AC, King CW, Scanlon BR. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*. 2016;36:2644-2659.

3 BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PROVÁVEL PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA NO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO

Teve-se como objetivo no presente trabalho calcular o balanço hídrico agrícola (*BHA*) provável no Estado do Paraná, para as culturas milho e soja. A série de dados climáticos (1980 a 2013; 34 anos) foi proveniente da Agência Nacional de Águas e Instituto Nacional de Meteorologia. Os dados climáticos foram espacializados com o melhor interpolador, obtido por validação cruzada, em *grid* regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, gerando 279 pontos para análise, cobrindo todo o Estado do Paraná. A evapotranspiração de referência (*ET_o*) foi calculada diariamente com o método de Penman-Monteith. O *BHA* foi calculado diariamente com o programa AquaCrop, que forneceu como dados de saída: evapotranspiração real (*ET_r*), deficiência hídrica (*Def*) e armazenamento de água no solo (*S*). Os dados diários de saída foram somados e agrupados em dez dias (decêndios) totalizando 37 decêndios por ano. Foram realizadas distribuições de frequência e aplicados testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade aos valores decendiais para realizar o ajustamento às funções densidade de probabilidade (*fdp*'s; Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme) para cada localidade. Determinou-se os valores decendiais prováveis de *S* a 50%, 75% e 90% de probabilidade (*S_{50%}*, *S_{75%}*, *S_{90%}*), *ET_r* e *Def* a 50%, 25% e 10% (*ET_{r50%}*, *ET_{r25%}*, *ET_{r10%}*, *Def_{50%}*, *Def_{25%}*, *Def_{10%}*), respectivamente. De modo geral, as *fdp*'s Normal e Gama são as que melhor se ajustam às componentes de saída do *BHA*. Por outro lado, a distribuição Uniforme teve baixa frequência de ocorrência, podendo ser descartada para ajustes futuros. As componentes do *BHA* médias nem sempre são iguais aos valores prováveis a 50%, visto que as componentes hídricas decendiais estudadas ajustaram-se melhor à *fdp* diferente da Normal. Considerando todo o Estado do Paraná, em média, a soja terá menor problema com restrição hídrica em relação ao milho se plantada no decêndio 29 (08 a 17 de outubro), considerando o cenário intermediário de disponibilidade hídrica ($P_{75\%} - ET_{r25\%}$).

Palavras-chave: Função densidade de probabilidade. Evapotranspiração. Armazenamento de água no solo. Deficiência hídrica. Aquacrop.

ABSTRACT

We aimed to calculate the probable agricultural water balance (*AWB*) in the Paraná State, for the crops corn and soybean. The series of climatic data (1980 to 2013; 34 years) came from the National Water Agency and National Institute of Meteorology. The climatic data were spatialized with the best interpolator, obtained by cross validation, in a regular grid of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, generating 279 points for analysis, covering the entire State of Paraná. The reference evapotranspiration (*ET_o*) was calculated daily by the Penman-Monteith method. The *AWB* was calculated daily with the AquaCrop program, providing as main output data: real evapotranspiration (*ET_r*), water deficit (*Def*) and soil water storage (*S*). The daily output data were summed and grouped in ten days periods (deccenials) totaling 37 ten days periods per year. Frequency distributions were applied and Kolmogorov-Smirnov adhesion tests were applied at 5% probability at the decennial values to perform the adjustment to probability density functions (*pdfs*) (Exponential, Gamma, Normal, Triangular and Uniform) for each locality. Probable values of *S* at 50, 75 and 90% probability (*S_{50%}*, *S_{75%}*, *S_{90%}*), *ET_r* and *Def* at 50, 25 and 10% (*ET_{r50%}*, *ET_{r25%}*, *ET_{r10%}*, *Def_{50%}*, *Def_{25%}*, *Def_{10%}*), respectively. In general, the *pdfs* Normal and Gamma are the ones that best fit the *AWB* output components. On the other hand, the Uniform distribution had a low frequency of occurrence and could be discarded for future adjustments. The average *AWB* components are not always equal to the probable values at 50%, since in these ten days the components fit better a function different than Normal. Considering the entire Paraná State, on average, soybean has a lower problem with water restriction than corn if planted in deccenial 29, considering an intermediate scenario of water availability ($P_{75\%} - ET_{r25\%}$).

Keywords: Probability density function. Evapotranspiration. Soil water storage. Water deficit. Aquacrop.

3.1 INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico está mudando sensivelmente nos últimos anos. O Brasil tem a agricultura como uma de suas maiores atividades econômicas, mas vem sofrendo com secas extremas, relacionadas principalmente com baixas precipitações, resultando no esgotamento da umidade do solo. A redução de 20% na precipitação durante um período prolongado de três anos (2013 a 2015) foi suficiente para causar condições de escassez de água no País, o que ocasionou sérios problemas sociais e econômicos (Famiglietti & Rodell, 2013; Getirana, 2016).

O balanço hídrico agrícola (*BHA*) é essencial para obtenção das condições reais da água no sistema solo-planta-atmosfera para diferentes locais e períodos. Suas componentes podem ser medidas diretamente em campo ou estimadas, a partir de dados climatológicos, utilizando modelos específicos (Khazaei & Hosseini, 2015). No entanto, Yan et al. (2012) enfatizaram a dificuldade da mensuração em campo, a qual é extremamente onerosa do ponto de vista econômico e prático, além da grande variabilidade espacial intrínseca de suas componentes. Por isso, o modelo AquaCrop, disponibilizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (Raes et al., 2016), vem se destacando na literatura, pois não necessita de medidas diretas. O AquaCrop se destaca também pela facilidade de uso, necessidade de poucos dados de entrada, possibilitando acurácia na estimativa de componentes hídricas e produtividades de várias culturas agrícolas, inclusive no Brasil (Steduto et al., 2012; Vanuytrecht et al., 2014).

No entanto, diversos autores consideram que o simples cálculo do *BHA* não é suficiente, sendo necessário estudos mais aprofundados para grandes regiões, considerando a variabilidade espacial e a probabilidade de ocorrência das componentes hídricas, uma vez que o uso de valores médios pode resultar em erros (Silva et al., 2015; Stagge et al., 2015). Por sua vez, o estudo probabilístico da distribuição das componentes hídricas demonstra que suas ocorrências consistem em fenômenos aleatórios influenciados pela localização geográfica. Por isso, muitos trabalhos se limitam a estudar pequenas regiões, como cidades, o que não contribui para macroplanejamentos, como vem ocorrendo inclusive no Estado do Paraná. Outra dificuldade encontrada está na obtenção de séries históricas consistentes, que sejam longas, sem falhas ou oscilação no número de anos, e que apresentem o

mesmo padrão instrumental de mensuração (Souza et al., 2013; Jerszurki et al., 2015a; Jerszurki et al., 2015b).

Dessa forma, estudos em grandes regiões, que minimizem os problemas mencionados devem ser priorizados e valorizados (Stagge et al., 2015; Vicente-Serrano et al., 2015). Com isso, é possível aumentar as aplicações do *BHA*: melhorar a acurácia das estimativas; planejamento das operações da atividade agropecuária; manejo de irrigação; previsão de safras; definição de zoneamentos agrícolas; entre outros (Praveena et al., 2012).

Diante das considerações dispostas anteriormente, teve-se por objetivo no presente trabalho calcular o balanço hídrico agrícola provável para as culturas milho e soja, no Estado do Paraná.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

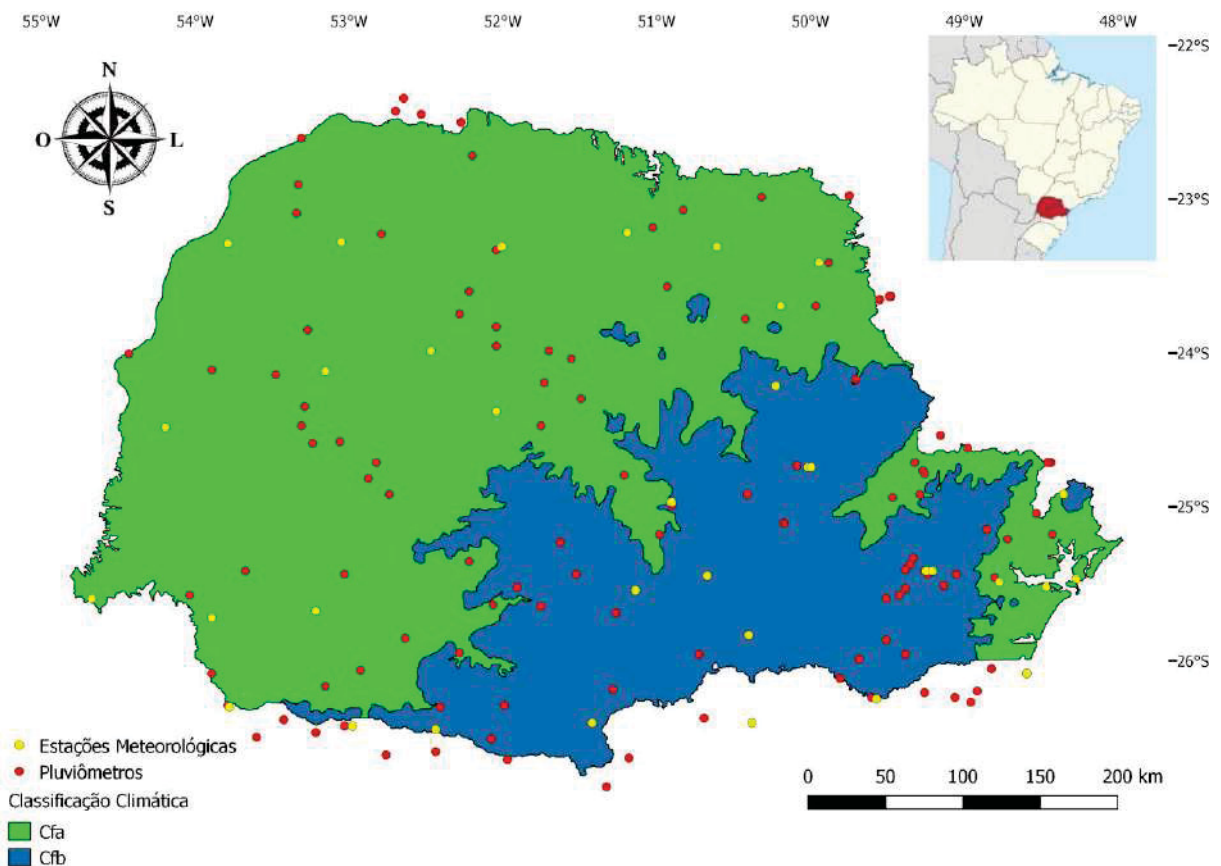
3.2.1 Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos

O Estado do Paraná está localizado na região Sul do Brasil e sua área é de 199.307,922 km². No Estado predominam dois tipos climáticos principais, de acordo com a classificação de Köppen: Cfa e Cfb (Figura 3.1). Quase todo o Estado está sujeito à ocorrência de mais de cinco dias de geada por ano. Contudo, no sul e partes de maior altitude dos planaltos do Estado é registrado ocorrência superior a dez dias (Maack, 2012). O clima Cfa, subtropical tem boa distribuição de chuvas, temperatura média anual de 19 °C e pluviosidade de 1500 mm anuais. O clima Cfb, subtropical, tem boa distribuição de chuvas durante o ano e verões amenos. A média anual das temperaturas é de 17 °C e a pluviosidade é superior a 1200 mm anuais (Alvares et al., 2013).

O conjunto de dados meteorológicos incluiu dados observados recolhidos diariamente a partir de pluviômetros (em média 151 unidades), bem como estações meteorológicas convencionais e automáticas (em média 38 unidades), no período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de Dezembro 2013 (34 anos) (Figura 3.1). As fontes dos dados foram o “Instituto Nacional de Meteorologia” (INMET) e “Agência Nacional de Águas” (ANA). Os dados da ANA foram limitados à precipitação pluviométrica (P). Os dados do INMET foram constituídos de: temperaturas máxima (T_{max} ; °C), mínima (T_{min} ; °C) e média (T_{med} ; °C) do ar, umidade relativa do ar (UR ; %), velocidade do

vento a 2 m de altura (u_2 , m s^{-1}), precipitação pluviométrica (P ; mm), brilho solar diário (n ; horas) de estações meteorológicas convencionais, e radiação solar diária (R_s , MJ m^{-2}) a partir de estações automáticas. Não foram observados dados das estações meteorológicas com coordenadas duplicadas. Assim, não foram removidas quaisquer medidas de pluviômetros ou dados das estações meteorológicas do conjunto de dados.

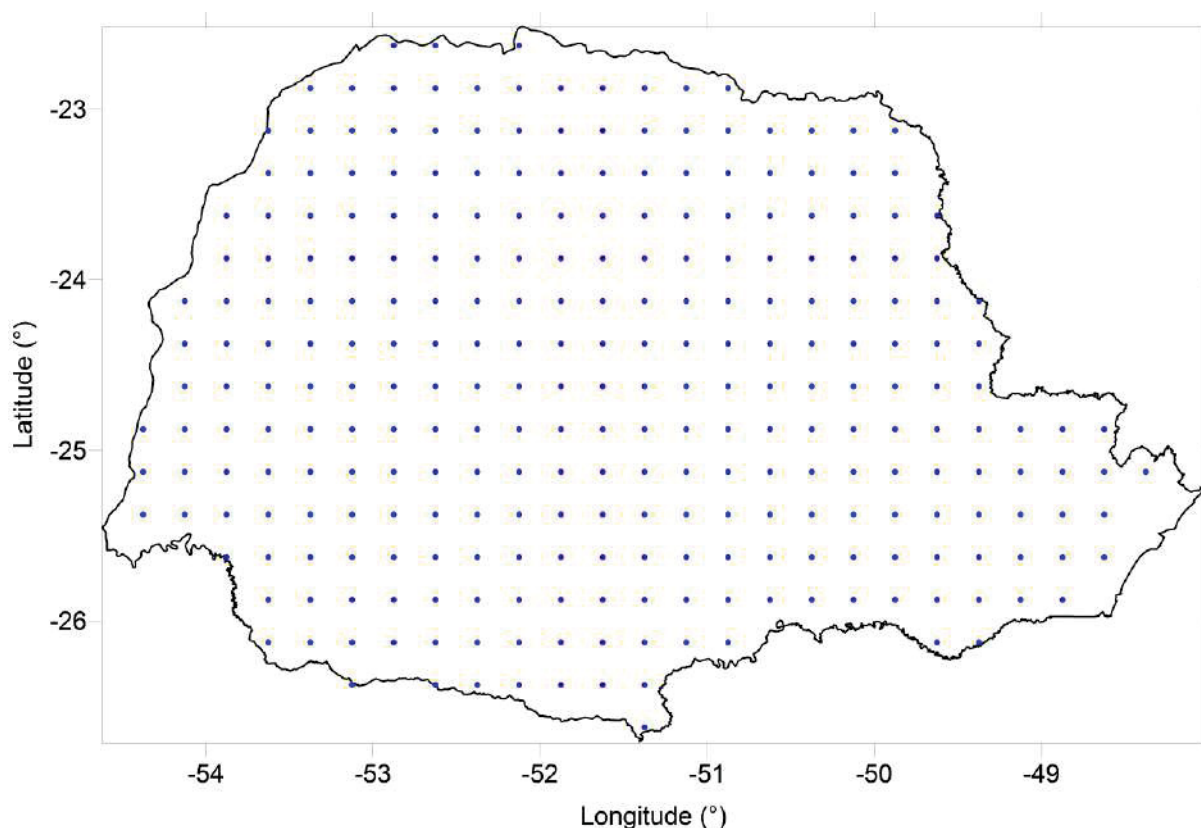
FIGURA 3.1 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN PARA O ESTADO DO PARANÁ E PLUVIÔMETROS E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS NO PRESENTE ESTUDO



FONTE: adaptado de ITCG (2006); O autor (2018).

Vários interpoladores foram testados para espacializar os dados meteorológicos: ponderação da distância inversa; *krigagem* ordinária; *spline*; interpolação natural; e, média aritmética. O melhor interpolador foi obtido por meio de validação cruzada, e os dados meteorológicos foram espacializados em *grid* regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, cobrindo todo o Estado do Paraná (Xavier et al., 2016). Como resultado obteve-se os dados meteorológicos (P , $T_{\text{máx}}$, $T_{\text{mín}}$, T_{med} , UR , U_2 , n , R_s) diários (34 anos) para o *grid* regular contendo 279 localidades (Figura 3.2).

FIGURA 3.2 – GRID REGULAR DE 0,25° X 0,25°, CONTENDO OS 279 PONTOS NO ESTADO DO PARANÁ, EM QUE FORAM ANALISADOS OS VALORES DIÁRIOS DE ET_o E P , AGRUPADOS EM DECÊNDIOS



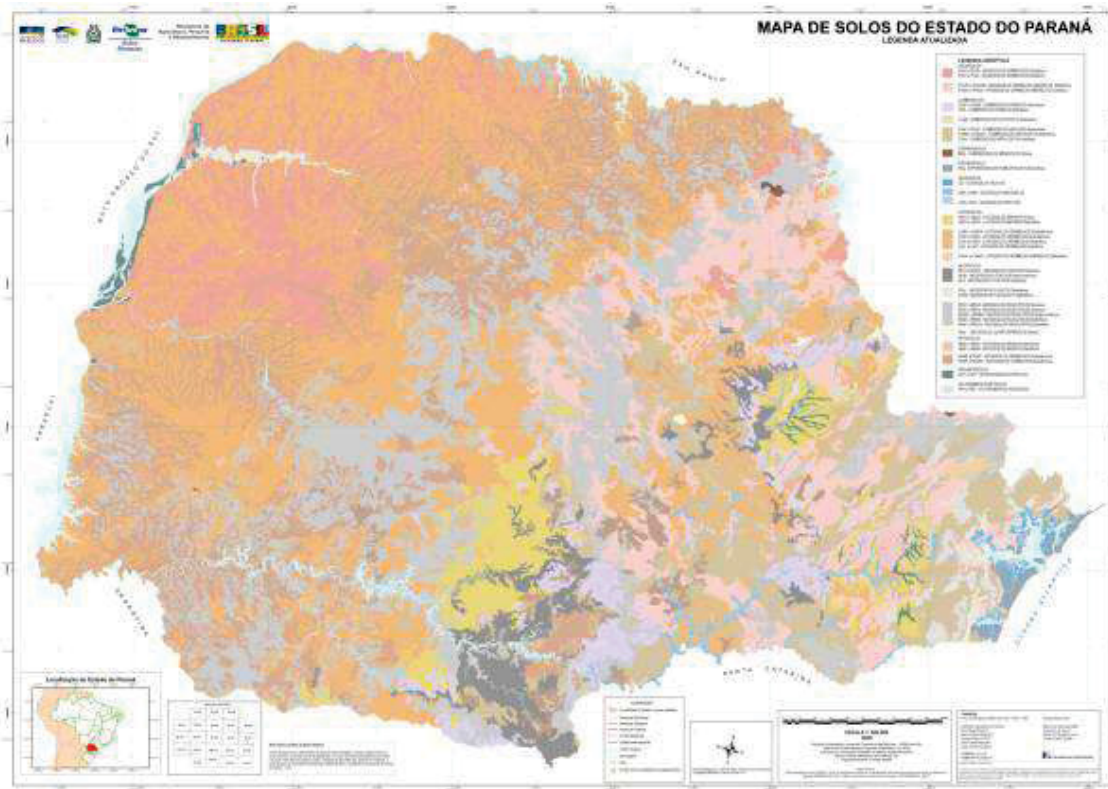
FONTE: O autor (2018).

3.2.2 Cálculo do balanço hídrico agrícola (BHA)

O cálculo do BHA foi realizado para as culturas milho e soja com o modelo AquaCrop, versão 5.0, disponibilizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (Raes et al., 2016). Não foram considerados estresses decorrentes de salinidade e fertilidade. O BHA foi realizado com periodicidade diária, resultando em séries de 34 anos de dados de saída. Os dados de entrada foram divididos em categorias: climáticos (dispostos no item anterior), de solo e da cultura. A ET_o (dado climático) foi calculada com o método de Penman-Monteith adaptado (ASCE-EWRI, 2005) (Apêndice 2). A metodologia completa utilizada para o cálculo do BHA no AquaCrop encontra-se no Apêndice 1.

Os parâmetros de solos (Apêndice 5 – Tabela A.5.1) foram considerados de acordo com a classificação de solos (Figura 3.3) e texturas predominantes na localidade do Estado do Paraná, onde os dados climáticos foram obtidos (Figura 3.2).

FIGURA 3.3 – MAPA DE SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: Bhering et al. (2007).

Os parâmetros das culturas milho e soja consideraram quatro períodos de desenvolvimento, conforme proposto por Allen et al. (1998), sendo que o período II (crescimento vegetativo ao início do florescimento) foi estendido ao longo de todo o ano (Apêndice 5 – Tabela A.5.2). Portanto, nos períodos I, III e IV as culturas tiveram apenas 1 dia. Assim, o período II, que é o de maior demanda hídrica, perdurou ao longo de todo o ano, nos 34 anos de *BHA* simulados.

As componentes de saída diárias do *BHA* (série de 34 anos) no AquaCrop são: evapotranspiração da cultura (*ETc*), armazenamento de água no solo na zona da raiz (*S*), evapotranspiração real (*ETr*), deficiência hídrica (*Def*), excedente hídrico (*Exc*), escoamento superficial (*ES*), infiltração de água no solo (*Inf*), drenagem profunda (*DP*), ascensão capilar (*AC*). No entanto, no presente estudo utilizou-se apenas a *ETr*, *Def* e *S*, pois são as componentes que mais contribuem para o *BHA*.

3.2.3 Balanço hídrico agrícola provável para o Estado do Paraná

Considerando os procedimentos metodológicos de Souza et al. (2013), foram realizados os seguintes passos:

- a) Agrupamento dos valores diários das componentes do *BHA* (*ETr*, *Def* e *S*) em períodos de dez dias (decêndios);
- b) Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados das séries observadas;
- c) Cálculo dos parâmetros estatísticos das funções densidade de probabilidade (*fdp*) Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme (Apêndice 3), com as séries de valores decendiais;
- d) Verificação da aderência dos valores decendiais às cinco *fdp*'s com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade;
- e) Escolha da *fdp* que melhor se ajustou a cada decêndio observado;
- f) Determinação dos valores prováveis à diferentes níveis de probabilidade de ocorrência.

Os valores diários das componentes de saída do *BHA* (*S*, *ETr*, *Def*) foram organizados em 37 decêndios por ano. O trigésimo sétimo decêndio de cada ano foi composto pelos cinco ou seis (ano bissexto) últimos dias do ano.

Foram consideradas as *fdp*'s Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme (Apêndice 3). Os parâmetros estatísticos determinados foram: alfa e beta, para a distribuição Gama; média e desvio padrão, para a Normal; maior valor, menor valor e moda, para a Triangular; média, para a Exponencial; e maior e menor valor, para a Uniforme (Assis et al., 1996; Bussab & Morettin, 2010).

A aderência dos valores decendiais às *fdp*'s foi obtida com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. O teste avalia por meio do valor D_{max} , o ajuste entre a distribuição de frequência acumulada teórica $F'(x)$ e outra, $F(x)$, proveniente dos dados amostrados.

$$D_{max} = \text{Max } |F(x) - F'(x)|$$

Sendo: D_{max} – valor crítico para a estatística de Kolmogorov-Smirnov; $F(x)$ – função de distribuição de probabilidade teórica; $F'(x)$ – função de distribuição de probabilidade observada.

Para a condição “ D_{max} calculado < D_{max} tabelado” aceita-se a hipótese de que os valores da amostra ajustam-se bem à distribuição de probabilidade a 5% de significância, caso contrário, a hipótese é rejeitada.

O valor de D_{max} tabelado foi estimado utilizando as seguintes equações, conforme recomendações de Assis et al. (1996) e Souza et al. (2013):

$$D_{max} = 0,971 - 0,2388 \ln N \quad \text{Para } N < 16$$

$$D_{max} = \frac{1,37}{\sqrt{N}} \quad \text{Para } N \geq 16$$

Sendo: D_{max} – valor crítico D_{max} da estatística de Kolmogorov-Smirnov; N – número de elementos da amostra (adimensional).

Depois de testada a aderência da *fdp* que melhor se ajustou às séries de dados de S , ETr e Def , para cada decêndio, determinou-se os valores decendiais prováveis de S a 50%, 75% e 90% de probabilidade, bem como, ETr e Def , a 10%, 25% e 50% de probabilidade, para cada localidade, respectivamente:

$$S_{50\%} = P(S_{50\%} \in S \mid S_i \geq S_{50\%}) = 50\%$$

$$S_{75\%} = P(S_{75\%} \in S \mid S_i \geq S_{75\%}) = 75\%$$

$$S_{90\%} = P(S_{90\%} \in S \mid S_i \geq S_{90\%}) = 90\%$$

$$ETr_{10\%} = P(ETr_{10\%} \in ETr \mid ETr_i \geq ETr_{10\%}) = 10\%$$

$$ETr_{25\%} = P(ETr_{25\%} \in ETr \mid ETr_i \geq ETr_{25\%}) = 25\%$$

$$ETr_{50\%} = P(ETr_{50\%} \in ETr \mid ETr_i \geq ETr_{50\%}) = 50\%$$

$$Def_{10\%} = P(Def_{10\%} \in Def \mid Def_i \geq Def_{10\%}) = 10\%$$

$$Def_{25\%} = P(Def_{25\%} \in Def \mid Def_i \geq Def_{25\%}) = 25\%$$

$$Def_{50\%} = P(Def_{50\%} \in Def \mid Def_i \geq Def_{50\%}) = 50\%$$

Logo, para cada decêndio, o $S_{75\%}$ refere-se ao valor de S que tenha 75% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade do armazenamento S_i ocorrer três vezes a cada quatro anos ou com tempo de retorno $T = 1,33$ anos, em média. Para cada decêndio, a $Def_{25\%}$ refere-se ao valor de deficiência Def_i que tenha 25% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da deficiência Def_i ocorrer uma vez a cada quatro anos ou com tempo de retorno $T = 4$ anos, em média.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Funções densidade de probabilidade

Várias distribuições de probabilidade têm sido utilizadas para ajustar as componentes de saída do balanço hídrico agrícola (*BHA*), apresentando variabilidade quanto à adequação às séries históricas. No entanto, não houve diferença entre os ajustes obtidos para as culturas milho e soja (Tabelas 3.1 e 3.2).

TABELA 3.1 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (N – NORMAL; G – GAMA; T – TRIANGULAR; E – EXPONENCIAL; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (*E_{Tr}*), DÉFICIT HÍDRICO (*Def*) E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO (*S*), PARA A CULTURA DO MILHO NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	<i>E_{Tr}</i>					<i>Def</i>					<i>S</i>				
	N	G	T	E	U	N	G	T	E	U	N	G	T	E	U
1	206	17	41	0	4	84	124	17	48	2	149	74	30	0	25
2	212	7	47	1	1	2	99	2	172	0	135	51	42	0	50
3	200	10	50	1	7	2	131	2	140	0	161	58	48	0	11
4	191	1	75	1	0	4	146	0	125	0	151	60	41	0	26
5	246	10	12	0	0	0	199	0	76	0	136	76	62	0	4
6	233	4	30	1	0	1	157	0	117	0	148	84	46	0	0
7	194	7	66	1	0	32	151	13	78	1	155	79	31	0	13
8	203	10	50	0	5	89	98	35	49	4	127	98	16	0	37
9	176	10	61	1	20	23	107	12	132	1	88	81	7	0	102
10	176	9	78	1	4	29	179	11	56	0	120	96	21	0	41
11	175	3	81	1	8	4	170	6	95	0	119	85	49	0	25
12	212	1	54	1	0	0	169	3	103	0	131	107	37	0	3
13	189	1	75	1	2	58	163	14	39	1	152	91	7	0	28
14	202	1	50	0	15	16	134	0	122	3	98	101	42	0	37
15	213	2	50	1	2	12	87	4	172	0	116	64	84	0	14
16	223	3	37	1	4	20	104	21	129	1	116	94	35	0	33
17	177	24	50	0	17	17	128	11	119	0	123	74	63	0	18
18	191	22	32	0	23	0	157	0	118	0	66	131	58	0	23
19	226	10	21	0	11	9	184	0	82	0	90	102	79	0	7
20	194	57	11	0	6	55	120	16	84	0	155	90	15	0	18
21	219	32	15	0	2	51	107	10	68	39	86	103	43	0	46
22	214	13	29	1	11	56	113	11	81	14	82	129	34	0	33
23	142	57	27	12	30	139	78	12	45	1	121	111	42	0	4
24	133	67	14	24	30	135	35	22	61	22	84	116	13	0	65
25	164	39	24	4	37	45	72	1	116	41	49	107	24	0	98
26	194	1	44	1	28	2	90	3	180	0	80	112	15	0	71
27	192	37	35	0	4	129	97	9	36	4	117	81	64	0	16
28	161	53	25	0	29	114	37	8	34	82	124	76	77	0	1
29	64	62	16	114	12	123	44	48	35	25	113	115	40	0	10
30	45	48	9	141	25	122	44	46	23	40	158	79	39	0	2
31	50	52	6	159	1	173	43	37	21	1	169	68	36	0	5
32	53	85	5	125	0	177	88	4	5	1	164	100	10	0	4
33	61	127	13	65	2	176	61	24	12	2	155	102	9	0	12
34	53	115	8	91	1	151	74	22	25	3	145	121	8	0	4
35	54	114	17	83	0	131	100	21	15	8	136	114	17	0	11
36	65	114	12	74	3	110	103	11	22	29	128	120	19	0	11
37	136	100	20	0	12	47	166	16	44	2	120	116	41	0	1
Soma	6039	1325	1290	906	356	2338	4159	472	2879	327	4567	3466	1344	0	909
Percentual (%)	60,9	13,4	13,0	9,1	3,6	22,98	40,87	4,64	28,29	3,21	44,40	33,70	13,07	0,00	8,84

FONTE: O autor (2018).

TABELA 3.2 – FREQUÊNCIA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE (N – NORMAL; G – GAMA; T – TRIANGULAR; E – EXPONENCIAL; U – UNIFORME) DE MELHOR AJUSTE PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (*ETr*), DÉFICIT HÍDRICO (*Def*) E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO (*S*), PARA A CULTURA DA SOJA NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	<i>ETr</i>					<i>Def</i>					<i>S</i>				
	N	G	T	E	U	N	G	T	E	U	N	G	T	E	U
1	37	112	21	79	7	166	81	24	8	0	209	47	16	0	6
2	49	155	6	39	7	80	154	27	18	0	168	73	30	0	7
3	23	232	1	0	0	8	125	6	139	1	169	74	21	0	14
4	200	7	47	0	2	1	152	0	126	0	139	77	43	0	19
5	221	10	25	0	0	0	207	0	72	0	113	83	79	0	3
6	222	3	29	0	2	1	159	0	119	0	148	87	42	0	1
7	187	5	64	0	0	35	147	15	80	2	150	79	31	0	18
8	190	9	52	0	5	93	117	30	34	5	131	95	18	0	34
9	153	18	64	0	21	23	108	8	140	0	82	95	15	0	86
10	164	9	73	0	10	35	190	13	41	0	124	91	26	0	37
11	167	5	74	0	10	6	168	5	100	0	104	104	39	0	31
12	206	5	45	0	0	8	170	1	100	0	143	94	38	0	3
13	187	2	66	0	1	61	158	13	46	1	152	96	13	0	17
14	192	0	53	0	11	10	126	0	140	3	86	98	72	0	22
15	200	2	51	0	3	17	90	9	163	0	116	85	67	0	10
16	205	5	41	0	5	26	101	24	128	0	110	86	50	0	32
17	176	20	44	0	16	14	133	13	117	2	122	96	46	0	14
18	182	19	36	0	19	2	147	1	129	0	112	87	60	0	19
19	208	6	28	0	14	4	188	2	85	0	95	100	76	0	7
20	189	50	10	0	7	45	131	15	88	0	162	82	15	0	19
21	207	37	11	0	1	56	101	13	65	44	84	104	50	0	40
22	208	11	29	0	8	62	98	15	92	12	86	114	50	0	28
23	136	50	29	12	29	131	88	10	48	2	127	122	18	0	11
24	100	68	11	24	53	155	22	20	37	45	79	111	11	0	77
25	145	55	13	6	37	61	107	4	56	51	48	98	21	0	111
26	147	2	48	0	59	14	97	6	162	0	56	111	3	0	108
27	205	14	32	0	5	16	158	15	90	0	136	94	26	0	22
28	197	11	48	0	0	25	89	19	146	0	125	99	48	0	6
29	206	20	27	0	3	13	157	2	106	1	149	84	40	0	5
30	179	46	28	0	3	45	161	22	48	3	141	81	45	0	11
31	97	138	21	0	0	171	62	27	17	2	147	89	38	0	4
32	64	120	18	51	3	164	57	40	14	4	162	89	23	0	4
33	63	92	3	97	1	171	69	22	11	6	170	97	10	0	1
34	42	38	13	159	4	174	44	33	26	2	126	142	7	0	3
35	47	137	9	58	5	190	57	6	22	4	118	135	11	0	14
36	46	124	13	69	4	197	48	8	25	1	134	126	7	0	11
37	52	121	11	72	0	173	56	16	32	2	91	104	83	0	0
Soma	5499	1758	1194	666	355	2453	4323	484	2870	193	4614	3529	1288	0	855
Percentual (%)	58,05	18,56	12,61	7,03	3,75	23,76	41,88	4,69	27,80	1,85	44,86	34,31	12,52	0	8,31

FONTE: O autor (2018).

Portanto, a natureza do fenômeno não se modificou, por isso, não será tratado a diferença na frequência de ocorrência entre as culturas, sendo abordados apenas aspectos em relação às componentes hídricas.

A *fdp* Uniforme não obteve bom ajuste às componentes de saída do *BHA* (*S*, *ETr* e *Def*). Como apresentou baixa frequência de melhor ajuste, acredita-se que a *fdp* Uniforme pode ser descartada para ajustes futuros envolvendo o estudo das relações.

Pruitt et al. (1972) consideram que as *fdp*'s mais utilizadas para o ajuste da *ETr* são a Normal, Gama, Beta e Gumbel, confirmando com os ajustes obtidos, principalmente para as distribuições Normal e Gama. No entanto, Blain & Brunini (2007) testando as melhores *fdp*'s para se ajustar à *ETr* no Estado de São Paulo, obtiveram melhores resultados para a *fdp* Beta, seguida da Normal, Log-normal e Gama. No entanto, o problema da *fdp* Beta está no fato de que ela é restrita ao intervalo de valores compreendidos entre o menor e maior valor da série utilizada para o cálculo de seus parâmetros.

Silva et al. (2008) comentam que a distribuição de frequência dos dados de deficiência hídrica do solo se assemelha à distribuição dos dados de precipitação, porém, ocorrendo concentração de frequência para os valores próximos de zero. Essa constatação, torna a distribuição dos dados de deficiência hídrica do solo tendendo mais à forma das *fdp*'s Lognormal, seguidas da Exponencial e Gama. O ajuste melhora para as *fdp*'s Exponencial e Gama quando são realizadas transformações nos dados pela raiz cúbica e raiz quadrada, respectivamente. De forma geral, os resultados encontrados por Silva et al. (2008) para o Sul do Rio Grande do Sul não concordam com os obtidos no presente trabalho. Contudo, os autores não utilizaram a metodologia da distribuição mista para a função Gama, o que pode ter diminuído consideravelmente seu ajuste aos valores de *Def*. Contrariamente, talvez por esse motivo, Nied et al. (2005) concluíram que a melhor *fdp* para a *Def* em Santa Maria-RS foi a Gama, bem como Stagge et al. (2015), que destacaram os bons resultados da *fdp* Gama após testarem as *fdp*'s Gama, Gumbel, Logística, Log-Logística, Lognormal, Normal e Weibull para toda a Europa.

Não teve nenhum decêndio de *S* que se ajustou à distribuição Exponencial, devido à natureza do fenômeno. Para Liu & Shao (2014) a *fdp* que melhor se ajusta aos dados de *S* é a Normal. Tal afirmativa foi confirmada por Siqueira et al. (2008), em Campinas-SP, e com os ajustes obtidos no presente trabalho.

Os parâmetros das *fdp*'s de melhor ajuste para as componentes hídricas *ETr*, *Def* e *S* obtidos para o *grid* regular de 0,25° x 0,25°, contendo os 279 pontos no Estado do Paraná, foram dispostos em uma planilha eletrônica (Apêndice 4) de forma a permitir os cálculos dos valores de *ETr*, *Def* e *S* para qualquer nível de probabilidade. O Apêndice 4 tem uma série de aplicações voltadas ao planejamento da agricultura. Os valores prováveis obtidos a partir dos parâmetros ajustados

podem servir de base para a realização zoneamentos de risco agroclimáticos para todo o Estado do Paraná (Ribeiro et al., 2013; Souza et al., 2013; Silva et al., 2015).

3.3.2 Componentes hídricas prováveis do balanço hídrico agrícola

As componentes de saída do *BHA* (*ET_r*, *Def* e *S*; Tabelas 3.3 a 3.8) no Estado do Paraná tiveram grande variação ao longo do ano.

TABELA 3.3 – VALORES PROVÁVEIS MÉDIOS DECENDIAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (*ET_r*, mm decêndio⁻¹), PARA DIFERENTES NÍVEIS DE PROBABILIDADE, PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Cultura							
	Milho				Soja			
	<i>ET_r</i> média	<i>ET_r</i> _{50%}	<i>ET_r</i> _{25%}	<i>ET_r</i> _{10%}	<i>ET_r</i> média	<i>ET_r</i> _{50%}	<i>ET_r</i> _{25%}	<i>ET_r</i> _{10%}
1	34,24	34,32	38,67	42,41	13,43	12,60	16,65	21,00
2	33,49	33,55	38,24	42,27	12,68	11,96	15,62	19,51
3	32,70	33,17	38,29	42,63	16,73	16,45	19,16	21,82
4	33,03	33,30	37,87	41,69	34,69	34,81	38,79	42,23
5	32,51	32,51	37,10	41,19	32,74	32,79	37,21	41,08
6	31,82	31,87	36,77	41,03	31,74	31,88	36,69	40,90
7	28,33	28,55	33,30	37,29	28,42	28,59	33,33	37,30
8	25,97	26,12	30,90	34,98	26,07	26,27	31,06	35,14
9	23,92	24,09	28,64	32,35	23,85	23,98	28,58	32,36
10	21,93	22,25	26,47	29,96	21,82	22,05	26,34	29,86
11	19,66	19,96	23,85	27,02	19,53	19,66	23,62	26,91
12	18,47	18,80	22,32	25,42	18,81	19,03	22,50	25,51
13	15,67	15,94	19,11	21,77	15,76	15,92	19,14	21,86
14	14,51	14,58	17,86	20,61	14,61	14,72	17,97	20,73
15	14,40	14,53	17,14	19,37	14,39	14,48	17,13	19,40
16	13,36	13,40	15,70	17,69	13,29	13,35	15,63	17,60
17	13,09	13,13	15,47	17,40	13,08	13,13	15,49	17,46
18	13,14	13,16	15,70	17,83	13,25	13,30	15,82	17,93
19	13,64	13,65	16,38	18,73	13,60	13,63	16,37	18,71
20	13,55	13,46	16,28	18,83	13,60	13,53	16,37	18,93
21	14,22	14,15	17,37	20,29	14,22	14,12	17,39	20,41
22	14,08	14,02	17,24	20,06	14,05	14,06	17,28	20,11
23	13,38	13,04	16,99	20,65	13,43	13,08	17,06	20,77
24	11,59	11,04	15,30	19,46	13,84	13,18	18,41	23,46
25	12,79	12,59	17,00	20,89	15,30	14,92	20,58	25,78
26	14,41	14,44	18,24	21,39	17,36	17,50	22,67	26,76
27	17,53	17,59	20,44	22,94	21,96	22,05	26,25	29,94
28	18,06	18,10	22,13	25,65	20,46	20,57	24,08	27,11
29	17,46	15,78	22,37	29,79	21,98	22,02	25,07	27,74
30	17,69	16,02	22,63	30,02	23,46	23,46	26,07	28,39
31	18,00	16,13	21,94	28,87	23,50	23,33	26,28	29,02
32	17,13	15,76	20,62	26,19	18,67	17,68	22,76	28,17
33	17,22	16,34	20,58	25,11	17,70	16,35	21,36	27,11
34	16,29	15,33	19,63	24,35	16,42	14,74	20,06	26,42
35	14,93	14,27	18,03	22,04	14,60	13,56	17,75	22,42
36	15,17	14,32	18,41	22,77	14,55	13,56	17,83	22,53
37	14,65	14,65	16,39	17,93	7,16	6,68	8,82	11,20
Média	19,24	19,03	23,01	26,73	18,40	18,19	21,98	25,50
Soma	712,05	703,95	851,37	988,86	680,72	672,97	813,16	943,58

FONTE: O autor (2018).

A Evapotranspiração Real (ETr) média nem sempre foi igual ao valor da $ETr_{50\%}$ decendial, principalmente quando a componente se ajustou melhor à fdp diferente da Normal (Tabela 3.3). Esse aspecto é importante, visto que são casos em que a média não reflete o valor provável a 50% de probabilidade. Nessa situação, a obtenção de melhor ajustamento com outras fdp 's, diferente da Normal, possibilita a obtenção de valores prováveis mais confiáveis.

Verificou-se, em média, que a cultura do milho teve consumo hídrico provável maior que a cultura da soja (Tabela 3.3), confirmando os resultados obtidos por Doorenbos & Pruitt (1977) que estabeleceram metodologia para determinar o consumo hídrico de diversas culturas agrícolas em várias regiões do mundo.

A partir dos valores de Precipitação (P) provável obtidas no Capítulo 2 para o Estado do Paraná e ETr obtidos no presente capítulo, realizou-se a diferença entre " $P_i - ETr_i$ " de cada i -ésimo decêndio (Tabela 3.4). Os resultados indicaram no cenário intermediário (" $P_{50\%} - ETr_{50\%}$ ") saldo positivo para precipitação. No entanto, para cenários restritivos e muito restritivos (" $P_{75\%} - ETr_{25\%}$ " e " $P_{90\%} - ETr_{10\%}$ ") a situação inverteu-se, para as culturas milho e soja. Apesar disso, deve-se verificar não apenas a média e soma anual, mas o saldo ao longo do ano, visto que as culturas (milho e soja) são semeadas em determinadas épocas do ano (Tabela 3.5).

Comparando os valores da soma entre Def média e $Def_{50\%}$ verificou-se diferença de aproximadamente 65 mm, para as culturas milho e soja (Tabela 3.6). Os resultados concordam também com Nied et al. (2005) e Stagge et al. (2015), que consideraram que a fdp Normal, e conseqüentemente a sua média, não reflete bem a tendência e estudos de valores prováveis de Def .

Segundo a Agência de Defesa Sanitária do Paraná, normalmente a semeadura da soja no Paraná ocorre de 01 de setembro a 31 de dezembro (ADAPAR, 2017). Neste período de tempo, o decêndio em que menos ocorreria Def , independentemente do nível de probabilidade, seria no decêndio 37 (semeadura de 27 a 31 de dezembro) (Tabela 3.7).

Farias et al. (2001), considerando todo o Estado do Paraná, verificaram que o período de semeadura entre 21 a 31 de dezembro proporcionou menor Def para a cultura da soja. Os autores realizaram cenários de simulações considerando Def a 80% de probabilidade de ocorrência, cultivar precoce (120 dias) e solo com média retenção de água (50 mm).

TABELA 3.4 – DIFERENÇA ENTRE OS VALORES PROVÁVEIS E MÉDIOS DECENDIAIS (mm decêndio⁻¹) DE PRECIPITAÇÃO (*P*) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (*ETr*), PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA, EM DIFERENTES CENÁRIOS NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Cultura							
	Milho				Soja			
	<i>P média – ETr média</i>	<i>P_{50%} – ETr_{50%}</i>	<i>P_{75%} – ETr_{25%}</i>	<i>P_{90%} – ETr_{10%}</i>	<i>P média – ETr média</i>	<i>P_{50%} – ETr_{50%}</i>	<i>P_{75%} – ETr_{25%}</i>	<i>P_{90%} – ETr_{10%}</i>
1	22,96	14,58	-10,27	-27,11	43,77	36,30	11,75	-5,70
2	36,20	28,95	-4,54	-28,77	57,01	50,54	18,08	-6,01
3	31,46	19,43	-9,89	-28,73	47,43	36,15	9,24	-7,92
4	28,43	20,90	-7,97	-29,99	26,77	19,39	-8,89	-30,53
5	32,96	25,99	-2,20	-22,89	32,73	25,71	-2,31	-22,78
6	23,90	19,13	-5,47	-24,03	23,98	19,12	-5,39	-23,90
7	12,53	4,35	-16,50	-30,39	12,44	4,31	-16,53	-30,40
8	19,43	10,08	-11,70	-25,58	19,33	9,93	-11,86	-25,74
9	20,40	6,51	-16,44	-29,45	20,47	6,62	-16,38	-29,46
10	12,45	3,85	-14,27	-25,86	12,56	4,05	-14,14	-25,76
11	26,89	16,74	-6,75	-23,12	27,02	17,04	-6,52	-23,01
12	34,48	10,90	-14,12	-24,92	34,14	10,67	-14,30	-25,01
13	23,55	5,16	-14,11	-21,57	23,46	5,18	-14,14	-21,66
14	42,99	19,12	-8,26	-19,91	42,89	18,98	-8,37	-20,03
15	38,39	19,87	-4,54	-17,47	38,40	19,92	-4,53	-17,50
16	24,54	10,80	-6,90	-15,79	24,61	10,85	-6,83	-15,70
17	32,69	13,97	-7,77	-16,40	32,70	13,97	-7,79	-16,46
18	41,51	17,84	-6,80	-16,73	41,40	17,70	-6,92	-16,83
19	24,88	9,25	-9,28	-17,93	24,92	9,27	-9,27	-17,91
20	28,13	8,04	-11,48	-18,63	28,08	7,97	-11,57	-18,73
21	19,13	5,45	-12,17	-19,79	19,13	5,48	-12,19	-19,91
22	19,69	-0,12	-14,94	-19,96	19,72	-0,16	-14,98	-20,01
23	20,17	-1,74	-15,59	-20,55	20,12	-1,78	-15,66	-20,67
24	27,12	0,96	-14,30	-19,36	24,87	-1,18	-17,41	-23,36
25	26,26	7,11	-13,10	-20,69	23,75	4,78	-16,68	-25,58
26	33,06	17,36	-9,54	-20,79	30,11	14,30	-13,97	-26,16
27	38,89	26,21	0,66	-15,84	34,46	21,75	-5,15	-22,84
28	40,27	23,30	-4,13	-19,35	37,87	20,83	-6,08	-20,81
29	41,97	33,82	4,53	-17,49	37,45	27,58	1,83	-15,44
30	39,47	32,78	4,57	-16,72	33,70	25,34	1,13	-15,09
31	31,79	29,27	4,16	-17,57	26,29	22,07	-0,18	-17,72
32	34,03	26,24	0,98	-17,39	32,49	24,32	-1,16	-19,37
33	26,05	17,96	-3,18	-17,91	25,57	17,95	-3,96	-19,91
34	34,05	25,27	1,27	-15,45	33,92	25,86	0,84	-17,52
35	43,24	35,73	10,77	-7,64	43,57	36,44	11,05	-8,02
36	35,23	26,08	2,39	-13,57	35,85	26,84	2,97	-13,33
37	18,70	7,25	-7,89	-16,33	26,19	15,22	-0,32	-9,60
Média	29,40	16,17	-6,89	-20,59	30,25	17,01	-5,85	-19,36
Soma	1087,89	598,39	-254,77	-761,67	1119,17	629,31	-216,59	-716,38

FONTE: O autor (2018).

TABELA 3.5 – SALDO⁽¹⁾ HÍDRICO MÉDIO ENTRE OS VALORES PROVÁVEIS DE PRECIPITAÇÃO (P) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ET_r), PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA (CONSIDERANDO CICLO DE 130 E 110 DIAS, RESPECTIVAMENTE), EM DIFERENTES CENÁRIOS NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Cultura							
	Milho				Soja			
	P média – ET_r média	$P_{50\%}$ – $ET_{r50\%}$	$P_{75\%}$ – $ET_{r25\%}$	$P_{90\%}$ – $ET_{r10\%}$	P média – ET_r média	$P_{50\%}$ – $ET_{r50\%}$	$P_{75\%}$ – $ET_{r25\%}$	$P_{90\%}$ – $ET_{r10\%}$
1 (01/jan)	326	187	-134	-342	324	229	-43	-231
2 (11/jan)	346	191	-132	-335	314	204	-69	-251
3 (21/jan)	348	182	-132	-324	280	158	-101	-266
4 (31/jan)	341	173	-129	-311	276	141	-119	-278
5 (10/fev)	345	166	-129	-297	287	142	-114	-265
6 (20/fev)	354	158	-134	-291	279	127	-119	-258
7 (02/mar)	355	148	-137	-285	288	122	-121	-251
8 (12/mar)	370	152	-132	-273	317	135	-112	-237
9 (22/mar)	370	148	-133	-268	323	134	-109	-229
10 (01/abr)	369	141	-131	-258	330	136	-104	-219
11 (11/abr)	377	135	-133	-253	337	137	-102	-213
12 (21/jan)	377	120	-140	-249	329	120	-111	-210
13 (01/mai)	369	116	-139	-245	315	107	-112	-205
14 (11/mai)	379	128	-135	-244	317	101	-116	-207
15 (21/mai)	374	135	-126	-240	298	87	-124	-213
16 (31/mai)	376	138	-125	-242	289	81	-133	-221
17 (10/jun)	394	161	-114	-244	299	92	-132	-228
18 (20/jun)	401	180	-102	-244	304	99	-130	-233
19 (30/jun)	391	192	-91	-245	300	109	-121	-231
20 (10/jul)	400	209	-80	-244	309	125	-111	-229
21 (20/jul)	398	219	-72	-243	307	139	-99	-228
22 (30/jul)	413	238	-59	-239	321	158	-88	-227
23 (09/ago)	436	274	-33	-227	327	176	-77	-227
24 (19/ago)	451	302	-15	-220	340	204	-61	-224
25 (29/ago)	454	316	-14	-230	359	241	-32	-208
26 (08/set)	458	330	-8	-238	371	263	-13	-196
27 (18/set)	459	337	-6	-246	389	282	7	-183
28 (28/set)	450	331	-15	-259	405	304	27	-166
29 (08/out)	440	331	-16	-266	420	327	47	-152
30 (18/out)	427	320	-25	-272	419	327	45	-155
31 (28/out)	405	299	-40	-283	415	324	38	-167
32 (07/nov)	389	277	-58	-293	417	324	35	-173
33 (17/nov)	375	259	-73	-303	403	312	25	-180
34 (27/nov)	366	246	-86	-313	393	301	15	-189
35 (07/dez)	351	231	-97	-322	379	283	0	-199
36 (17/dez)	339	209	-119	-338	352	252	-27	-218
37 (27/dez)	333	191	-135	-348	336	236	-40	-229

FONTE: O autor (2018).

⁽¹⁾ Somatório de $P - ET_o$, tendo o respectivo decêndio como plantio e o ciclo de cada cultura (13 e 11 decêndios para milho e soja, respectivamente).

TABELA 3.6 – MÉDIA DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA (*Def*) DECENDIAL PROVÁVEL (mm decêndio⁻¹), PARA DIFERENTES NÍVEIS DE PROBABILIDADE, PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Cultura							
	Milho				Soja			
	<i>Def</i> média	<i>Def</i> _{50%}	<i>Def</i> _{25%}	<i>Def</i> _{10%}	<i>Def</i> média	<i>Def</i> _{50%}	<i>Def</i> _{25%}	<i>Def</i> _{10%}
1	12,66	10,69	17,62	25,41	27,86	26,68	30,89	35,45
2	12,30	8,30	16,75	28,02	21,37	20,51	24,24	28,24
3	11,64	8,14	15,89	26,07	9,70	7,70	12,90	19,33
4	11,38	7,89	15,54	25,64	9,89	6,77	13,52	22,40
5	9,32	6,14	12,68	21,52	9,26	6,22	12,72	21,37
6	9,25	6,71	12,67	20,38	9,29	6,73	12,81	20,53
7	13,56	11,07	18,65	27,74	13,64	11,13	18,86	28,05
8	12,37	10,61	17,42	24,97	12,68	11,05	17,79	25,19
9	12,60	9,58	17,40	27,14	12,71	9,61	17,54	27,57
10	12,47	10,51	16,79	24,21	12,76	10,92	17,12	24,41
11	11,34	8,66	15,46	24,02	11,46	8,70	15,61	24,45
12	9,09	6,61	12,32	19,64	8,70	6,44	11,80	18,69
13	9,12	7,54	12,55	18,38	8,95	7,40	12,30	18,04
14	7,15	4,96	9,66	15,77	7,17	4,88	9,67	15,94
15	5,83	3,91	7,78	12,81	5,98	4,08	8,03	13,07
16	5,51	3,90	7,36	11,64	5,60	3,98	7,50	11,84
17	5,65	4,04	7,66	12,24	5,80	4,16	7,88	12,52
18	5,10	3,12	6,66	11,43	5,23	3,31	6,95	11,68
19	6,13	4,45	8,23	13,07	6,21	4,43	8,40	13,39
20	6,88	5,53	9,45	14,00	6,81	5,37	9,41	14,05
21	8,08	6,96	11,18	15,65	8,24	7,17	11,54	15,90
22	10,26	8,76	14,07	20,04	10,06	8,59	13,87	19,65
23	14,01	12,75	19,45	26,58	13,99	12,61	19,51	26,88
24	12,49	11,44	17,68	23,98	16,11	15,24	22,89	30,12
25	11,66	9,85	16,40	23,70	17,04	14,95	23,84	33,35
26	11,21	8,11	15,41	24,92	15,98	11,84	22,00	35,17
27	9,20	8,31	12,22	16,49	11,90	9,23	16,24	24,93
28	12,56	11,93	17,55	22,50	9,27	6,89	12,88	20,12
29	17,86	17,54	23,43	28,78	6,85	5,20	9,48	14,62
30	21,66	21,42	28,15	33,70	6,99	5,84	9,75	13,99
31	26,08	25,84	31,21	36,05	11,82	11,40	15,33	18,91
32	29,62	29,09	33,66	38,13	22,42	22,13	27,13	31,70
33	32,42	31,33	35,39	39,56	27,89	27,48	31,58	35,55
34	33,83	32,71	36,83	41,32	29,80	28,73	33,08	37,51
35	32,37	31,13	35,11	39,53	29,28	28,11	32,74	37,28
36	31,01	29,55	34,78	40,59	30,38	29,25	33,93	38,76
37	8,34	7,58	10,47	13,67	15,47	14,78	17,45	20,12
Média	13,84	12,07	17,61	24,03	13,37	11,61	17,00	23,26
Soma	512,01	446,63	651,51	889,27	494,53	429,51	629,18	860,73

FONTE: O autor (2018).

TABELA 3.7 – SALDO⁽¹⁾ DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA (*Def*) DECENDIAL PROVÁVEL (mm decêndio⁻¹), PARA DIFERENTES NÍVEIS DE PROBABILIDADE, PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Cultura							
	Milho				Soja			
	<i>Def</i> média	<i>Def</i> _{50%}	<i>Def</i> _{25%}	<i>Def</i> _{10%}	<i>Def</i> média	<i>Def</i> _{50%}	<i>Def</i> _{25%}	<i>Def</i> _{10%}
1 (01/jan)	147	112	202	313	168	140	194	314
2 (11/jan)	142	107	194	304	148	118	175	294
3 (21/jan)	135	102	185	288	132	102	163	279
4 (31/jan)	129	98	176	274	128	98	160	272
5 (10/fev)	123	94	168	260	124	95	154	262
6 (20/fev)	119	91	162	250	120	92	149	252
7 (02/mar)	116	89	158	243	117	90	144	245
8 (12/mar)	109	83	149	229	110	84	132	231
9 (22/mar)	105	80	143	220	106	80	123	222
10 (01/abr)	103	79	139	213	103	79	115	214
11 (11/abr)	104	81	142	215	104	81	109	216
12 (21/jan)	105	84	144	215	109	88	107	222
13 (01/mai)	108	87	148	219	117	96	115	236
14 (11/mai)	110	88	151	226	124	101	126	254
15 (21/mai)	112	91	154	227	129	105	140	263
16 (31/mai)	119	99	163	236	132	108	154	270
17 (10/jun)	131	113	179	253	133	109	163	272
18 (20/jun)	147	130	200	275	135	111	168	274
19 (30/jun)	168	153	224	299	141	119	170	281
20 (10/jul)	192	178	250	325	157	136	171	299
21 (20/jul)	217	203	276	350	179	159	177	321
22 (30/jul)	243	229	301	376	200	180	193	343
23 (09/ago)	265	251	322	395	219	200	211	360
24 (19/ago)	282	268	338	409	236	216	224	372
25 (29/ago)	284	270	339	412	249	229	234	380
26 (08/set)	285	269	340	415	257	238	244	378
27 (18/set)	286	269	341	417	256	240	255	367
28 (28/set)	288	269	345	426	254	238	266	363
29 (08/out)	286	264	341	427	254	238	272	365
30 (18/out)	277	253	330	419	257	239	276	371
31 (28/out)	267	241	318	410	261	242	279	381
32 (07/nov)	254	226	305	400	263	242	277	389
33 (17/nov)	237	207	289	388	253	230	265	384
34 (27/nov)	217	185	270	374	238	213	252	374
35 (07/dez)	195	162	250	357	220	194	237	361
36 (17/dez)	173	139	228	339	201	173	221	345
37 (27/dez)	151	116	206	318	179	151	204	325

FONTE: O autor (2018).

⁽¹⁾ Somatório dos valores médios de *Def*, tendo o respectivo decêndio como plantio e o ciclo de cada cultura – 13 e 11 decêndios para milho e soja, respectivamente.

TABELA 3.8 – ARMAZENAMENTO PROVÁVEL MÉDIO DE ÁGUA NO SOLO (S), PARA PERÍODO DECENDIAL (mm decêndio^{-1}), OBTIDO PARA DIFERENTES NÍVEIS DE PROBABILIDADE, PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA NO ESTADO DO PARANÁ

Cultura Decêndio	Milho				Soja			
	S médio	S _{50%}	S _{75%}	S _{90%}	S médio	S _{50%}	S _{75%}	S _{90%}
1	325,49	325,61	318,44	312,22	245,02	244,67	238,69	233,49
2	327,49	327,59	319,72	313,01	247,19	246,99	241,18	236,07
3	327,88	327,94	321,16	315,16	247,87	247,75	243,28	239,57
4	328,96	328,85	322,85	317,61	243,87	243,56	239,46	235,90
5	330,34	329,71	324,06	319,05	243,56	243,33	238,92	235,00
6	330,26	330,45	325,38	320,83	243,31	243,30	239,04	235,25
7	328,08	327,81	323,32	319,37	241,07	240,99	236,95	233,43
8	327,97	328,14	323,37	319,31	240,65	240,56	236,64	233,30
9	328,50	328,40	323,37	319,39	241,43	241,07	236,77	233,35
10	327,68	327,46	322,90	319,06	240,58	240,41	236,41	233,04
11	328,16	328,38	323,74	319,73	241,06	241,10	236,89	233,31
12	330,12	330,36	325,85	321,82	243,33	243,32	239,27	235,67
13	329,17	329,17	324,39	320,26	242,39	242,42	238,22	234,54
14	330,29	330,60	325,56	321,29	243,29	243,25	238,53	234,49
15	331,33	331,79	327,11	323,04	244,03	244,04	239,70	235,91
16	331,18	331,21	326,46	322,42	243,96	243,94	239,61	235,95
17	331,21	331,45	327,35	323,81	244,10	243,73	240,05	236,87
18	332,48	332,50	327,74	323,67	244,92	244,71	240,58	237,05
19	331,05	331,19	327,14	323,61	243,78	243,72	239,86	236,49
20	330,25	330,21	326,45	323,19	243,29	243,17	239,67	236,65
21	329,79	329,79	325,58	322,11	242,61	242,52	238,66	235,47
22	328,09	328,12	324,20	320,90	241,21	241,07	237,39	234,27
23	326,66	326,54	322,42	318,84	239,80	239,63	235,65	232,17
24	326,46	326,42	321,32	317,16	239,17	239,07	234,28	230,43
25	326,85	327,00	321,77	317,73	238,81	238,73	233,82	230,11
26	328,36	328,62	323,03	318,55	240,00	239,78	234,29	230,05
27	330,80	330,80	326,02	321,89	241,78	241,72	237,25	233,39
28	332,59	332,97	328,00	323,65	243,70	243,72	239,02	234,88
29	332,68	332,91	328,32	324,31	244,85	244,85	240,92	237,45
30	333,59	333,47	328,80	324,68	245,78	245,73	242,30	239,32
31	332,42	332,75	328,35	324,47	245,25	245,24	242,05	239,21
32	331,70	331,65	326,80	322,54	245,72	245,65	241,48	237,78
33	329,52	329,51	323,77	318,91	244,00	243,91	238,58	233,83
34	328,08	327,95	321,79	316,49	242,46	242,11	235,75	230,15
35	329,08	328,02	321,69	316,35	243,44	243,22	236,02	229,92
36	328,90	328,49	321,62	315,75	243,49	242,79	235,47	229,18
37	172,60	171,47	161,54	152,89	127,97	126,24	118,88	112,47
Média	325,30	325,28	320,04	315,54	239,97	239,78	235,18	231,23
Soma	12036	12035	11841	11675	8879	8872	8702	8555

FONTE: O autor (2018).

Não se verificou divergência entre S médio e S_{50%}. No entanto, é importante observar que valores médios de S podem variar bastante, dependendo do clima, solo e cultura cultivada no local (Tabela 3.8). Liu & Shao (2014) encontraram valores médios de S de 166,7 mm para soja na China, em solo com 1,0 m de profundidade, textura franca (classificação textural da USDA, com 45-51% de areia, 30-45% de silte e 11-14% de argila), massa específica de 1500 kg m⁻³ e condutividade hidráulica da camada superior do solo (0,0-0,2 m) de 0,94 mm min⁻¹. Li & Shao

(2014) também encontraram valores médios de S de 255,40 mm para milho irrigado na China, em diferentes tipos de solo (Inceptosols e Aridsols) com 1,0 m de profundidade.

3.4 CONCLUSÕES

As funções densidade de probabilidade (*fdp's*) Normal e Gama se ajustam melhor às componentes de saída (ET_r , Def e S) do balanço hídrico agrícola. A *fdp* Uniforme não é adequada para realizar ajustes às componentes hídricas (ET_r , Def e S) de saída do balanço hídrico agrícola.

Os valores decendiais médios das componentes de saída do balanço hídrico agrícola (ET_r , Def e S) não são iguais aos valores prováveis a 50%, devido às séries de valores decendiais das componentes se ajustarem melhor à *fdp's* (Exponencial, Gama, Triangular e Uniforme) diferentes da Normal.

Considerando todo o Estado do Paraná, em média, a cultura da soja tem menor problema com restrição hídrica em relação à cultura do milho, se semeada no decêndio 29 (08 a 17 de outubro) e considerando cenário intermediário de disponibilidade hídrica ($ET_{r25\%} - P_{75\%}$).

3.5 REFERÊNCIAS

- ADAPAR - Agência de Defesa Sanitária do Paraná. Portaria nº 202, de 19 de julho de 2017. Estabelece o período do vazio sanitário, as datas limites para semeadura e colheita da soja no Estado do Paraná, e dá outras providências.
- Alvares, CA, Stape JL, Sentelhas PJ, Gonçalves JLM., Sparovek G. Koppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift. 2013; 2:711-728.
- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: Institute of the American Society of Civil Engineers; 2005.
- Assis FN, Arruda HV, Pereira AR. Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática. Pelotas: Ed. da UFPel, 1996. 161p.
- Bhering SB, Santos HG, Manzatto CV, Bognola I, Carvalho AP, Potter O, Aglio MLD, Silva JS, Chaffin CE, Carvalho Junior W. Mapa de Solos do Estado do Paraná. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2007.
- Blain GC, Brunini O. Caracterização do regime de evapotranspiração real, em escala decendial, no estado de São Paulo. Revista Brasileira de Meteorologia. 2007;22(1):75-82.
- Bussab WO, Morettin PA. Estatística básica. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540p.
- Doorenbos J, Pruitt WO. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper n. 24, 1977. 179 p.

- Famiglietti JS, Rodell M. Water in the balance. *Science*. 2013;340(6138):1300-1301.
- Farias JRB, Assad ED, Almeida IR, Evangelista BA, Lazzarotto C, Neumaier N, Nepomuceno AL. Caracterização de risco climático nas regiões produtoras de soja no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001;9(3):415-421.
- Getirana A. Extreme water deficit in Brazil detected from space. *Journal of Hydrometeorology*. 2016;17(2):591-599.
- ITCG – Instituto de Terras Cartografias e Geociências. Mapa de clima do Estado do Paraná. Curitiba: ITCG, 2006.
- Jerszurki D, Souza JLM, Evangelista AWP. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba-PR. *Revista Brasileira de Biometria*. 2015a;33(2):118-129.
- Jerszurki D, Souza JLM, Evangelista AWP. Distribuição de probabilidade e movimento temporal da precipitação na região de Telêmaco Borba, Paraná. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 2015b;10(1):110-116.
- Khazaei B, Hosseini SM. Improving the performance of water balance equation using fuzzy logic approach. *Journal of Hydrology*. 2015;524:538-548.
- Li D, Shao M. Temporal stability analysis for estimating spatial mean soil water storage and deep percolation in irrigated maize crops. *Agricultural Water Management*. 2014;144:140-149.
- Liu B, Shao M. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*. 2014;517:974-984.
- Maack R. Geografia física do Estado do Paraná. 4th ed. Curitiba: IBPT; 2012.
- Nied AH, Heldwein AB, Estefanel V, Silva JC, Alberto CM. Épocas de semeadura do milho com menor risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS, Brasil. *Ciência Rural*. 2005;35(5):995-1002.
- Praveena SM, Abdullah MH, Bidin K, Aris AZ. Modeling of water balance components in a small island via a numerical model application. *Journal of Coastal Research*. 2012;28(1):202-209.
- Pruitt WO, Oettingen SV, Morgan DL. Central California evapotranspiration frequencies. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 1972;98:177-184.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop version 5.0 reference manual. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.
- Ribeiro BT, Ferreira Junior DC, Silva CR. Ten-day probable rainfall for Uberlândia, Minas Gerais State, Brazil. *Bioscience Journal*. 2013;29(3):536-542.
- Silva JC, Heldwein AB, Trentin G, Streck NA, Martins FB. Funções de distribuição de probabilidade decendial e mensal para a deficiência hídrica no solo. *Ciência Rural*. 2008;38(7):1893-1899.
- Silva AO, Correia JS, Bassoi LH, Teixeira AHC. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, PE. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*. 2015;9(1):30-38.
- Siqueira GM, Vieira SR, Camargo MBP. Variabilidade espacial do armazenamento e perda média diária de água pelo solo no sistema de semeadura direta em Campinas, SP. *Bragantia*. 2008;67(1):213-223.
- Souza JLM, Jerszurki D, Damazio EC. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2013;48(7):693-702.
- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Loonc AFV, Stahl K. Candidate distributions for climatological drought indices. *International Journal of Climatology*. 2015;35:4027-4040.

- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- Vanuytrecht E, Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Heng LK, Vila MG, Moreno PM. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environ. Model. Softw.*, 2014;62:351–360.
- Vicente-Serrano SM, Schrier GV, Beguería S, Azorin-Molina C, Lopez-Moreno JL. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology*. 2015;526:42-54.
- Xavier AC, King CW, Scanlon BR. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*. 2016;36:2644-2659.
- Yan Z, Gottschalk L, Leblois E, Xia J. Joint mapping of water balance components in a large Chinese basin. *Journal of Hydrology*. 2012;450:59-69.

4 ZONEAMENTO DE RISCO AGROCLIMÁTICO PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA NO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO

Teve-se como objetivo no presente trabalho calcular os indicadores de risco climático das culturas milho e soja para o Estado do Paraná, obtidos por meio de componentes hídricas e térmicas, para fins de zoneamento de risco agroclimático e para avaliar a sensibilidade e melhoria em relação aos atuais mapas de zoneamento agrícola desenvolvidos por instituições públicas brasileiras. A série de dados climáticos teve 34 anos (1980 a 2013), os quais foram espacializados com o melhor interpolador obtido por validação cruzada, em *grid* regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, gerando 279 pontos para análise, cobrindo todo o Estado do Paraná. O balanço hídrico agrícola (*BHA*) foi calculado diariamente com o programa AquaCrop, que forneceu como dados de saída a evapotranspiração da cultura (*ETc*) e evapotranspiração real (*ETr*). Os dados diários de saída, juntamente com dados de temperatura mínima (*Tmín*) e máxima (*Tmáx*) do ar foram somados e agrupados em dez dias (decêndios). Foram realizadas distribuições de frequência e aplicados testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade aos valores decendiais para realizar o ajustamento às funções densidade de probabilidade (*fdp's*; Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme) para cada localidade. Determinou-se os valores decendiais prováveis de *Tmín* a 50%, 75% e 90% de probabilidade, *Tmáx* a 10%, 25% e 50%, *ETc* e *ETr* a 10%, 25% e 50% de probabilidade. Os parâmetros mínimos de necessidade hídrica foram calculados por meio do Índice de Satisfação de Necessidade de Água (*ISNA*), e de necessidade térmica pela *Tmín* e *Tmáx* suportadas pelas culturas. Em média, considerando os riscos hídricos e térmicos, os decêndios 30 (18 out) e 35 (07/dez) são os mais favoráveis para a semeadura do milho e soja no Estado do Paraná, respectivamente, persistindo até meados de janeiro. A principal diferença das metodologias de zoneamentos de risco climático de entidades públicas governamentais está no uso da probabilidade para estimar os valores de ocorrência das variáveis climáticas.

Palavras-chave: Zoneamento agrícola. Planejamento. Época de semeadura. Balanço hídrico. Aquacrop.

ABSTRACT

This study aimed to calculate the climatic risk indicators of the crops corn and soybean for the Paraná State, obtained by water and thermal components for the purpose of agroclimatic risk zoning, in order to evaluate the sensitivity and improvement in relation to the current agricultural zoning maps developed by Brazilian public institutions. The series of climatic data was 34 years (1980 to 2013), which were spatialized with the best interpolator obtained by cross-validation, in a regular grid of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, generating 279 points for analysis, covering the entire Paraná State. The agricultural water balance (*AWB*) was daily calculated with the AquaCrop program, which provided as output data crop evapotranspiration (*ETc*) and real evapotranspiration (*ETr*). The daily output data, together with minimum (*Tmin*) and maximum (*Tmax*) air temperature data were summed and grouped in ten days (deccenials). Frequency distributions were applied and Kolmogorov-Smirnov adhesion tests were applied at 5% probability at the decennial values, to perform the adjustment to the probability density functions (*pdfs*; Exponential, Gamma, Normal, Triangular and Uniform) for each locality. The probable values of *Tmin* were determined at 50%, 75% and 90% probability, *Tmax* at 10%, 25% and 50%, *ETc* and *ETr* at 10%, 25% and 50% probability. The minimum parameters of water requirement were calculated using the Water Need Satisfaction Index (*WNSI*), and the thermal need for the *Tmin* and *Tmax* supported by the crops. On average, considering the water and thermal risks, the deccenials 30 (18/oct) and 35 (07/dec) are the most favorable for the planting of corn and soybean in the Paraná State, respectively, persisting until the middle of January. The main difference between the methodologies of climatic risk zoning of public governmental entities is the use of probability to estimate the occurrence values of climatic variables.

Keywords: Agricultural zoning. Planning. Planting date. Water balance. Aquacrop.

4.1 INTRODUÇÃO

O balanço hídrico agrícola (*BHA*) é essencial para obtenção das condições reais da água no sistema solo-planta-atmosfera, para diferentes locais e períodos. Suas componentes podem ser medidas diretamente em campo ou estimadas a partir de dados climatológicos, utilizando modelos específicos (Yan et al., 2012; Khazaei & Hosseini, 2015). No entanto, diversos autores comentam que o simples cálculo do *BHA* não é suficiente, havendo a necessidade de estudos mais aprofundados para grandes regiões, considerando a variabilidade espacial das componentes hídricas e a probabilidade de sua ocorrência, uma vez que o uso de valores médios pode resultar em erros (Soccol et al., 2010, Silva et al., 2015). Com isso, é possível aumentar as aplicações do *BHA*, melhorando: a acurácia das estimativas; o planejamento das operações das atividades agropecuárias; manejo de irrigação; previsão de safras; definição de zoneamentos agrícolas; entre outros (Praveena et al., 2012).

O zoneamento agrícola no Brasil é utilizado atualmente como instrumento de política agrícola de gestão de riscos. O estudo visa minimizar riscos relacionados a fenômenos climáticos, permitindo identificar a melhor época de plantio ou semeadura das culturas, nos diferentes tipos de solo e ciclos de cultivares. A metodologia ganhou importância devido à nova dinâmica de normatização do crédito e seguro agrícola implementados no País, que restringe o enquadramento de empresas e produtores aos plantios delimitados em determinadas condições e áreas de abrangência (Rossetti, 2001; Sentelhas et al., 2008; MAPA, 2016).

Entidades governamentais brasileiras vêm estabelecendo diversos zoneamentos agrícolas para culturas de grande importância comercial (Caramori, 2003; MAPA, 2016). No entanto, tal informação é subutilizada, pois não se usa a metodologia do *BHA* e probabilidade de ocorrência com profundidade, o que poderia melhorar a acurácia das previsões, quantificar melhor a probabilidade de perdas e servir de apoio ao planejamento agrícola de empresas rurais e entidades governamentais (Rio et al., 2016).

A agricultura tem posição de destaque econômico no Estado do Paraná, respondendo por quase 7% do Produto Interno Bruto (IPARDES, 2017). Na safra 2016/2017, foram plantados no Estado 2917,0 e 5249,6 mil ha de milho e soja, respectivamente, totalizando 16% do total das áreas cultivadas no Brasil. A

produção de 17837,8 e 19586,3 mil t ha⁻¹, correspondendo a 18% e 17% da produção brasileira de milho e soja, respectivamente (CONAB, 2017).

Diante das considerações dispostas anteriormente, teve-se como objetivo no presente trabalho calcular os indicadores de risco climático das culturas milho e soja para o Estado do Paraná, obtidos por meio de componentes hídricas e térmicas para fins de zoneamento de risco agroclimático, para avaliar a sensibilidade e melhoria em relação aos atuais mapas de zoneamento agrícola desenvolvidos por instituições públicas brasileiras.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

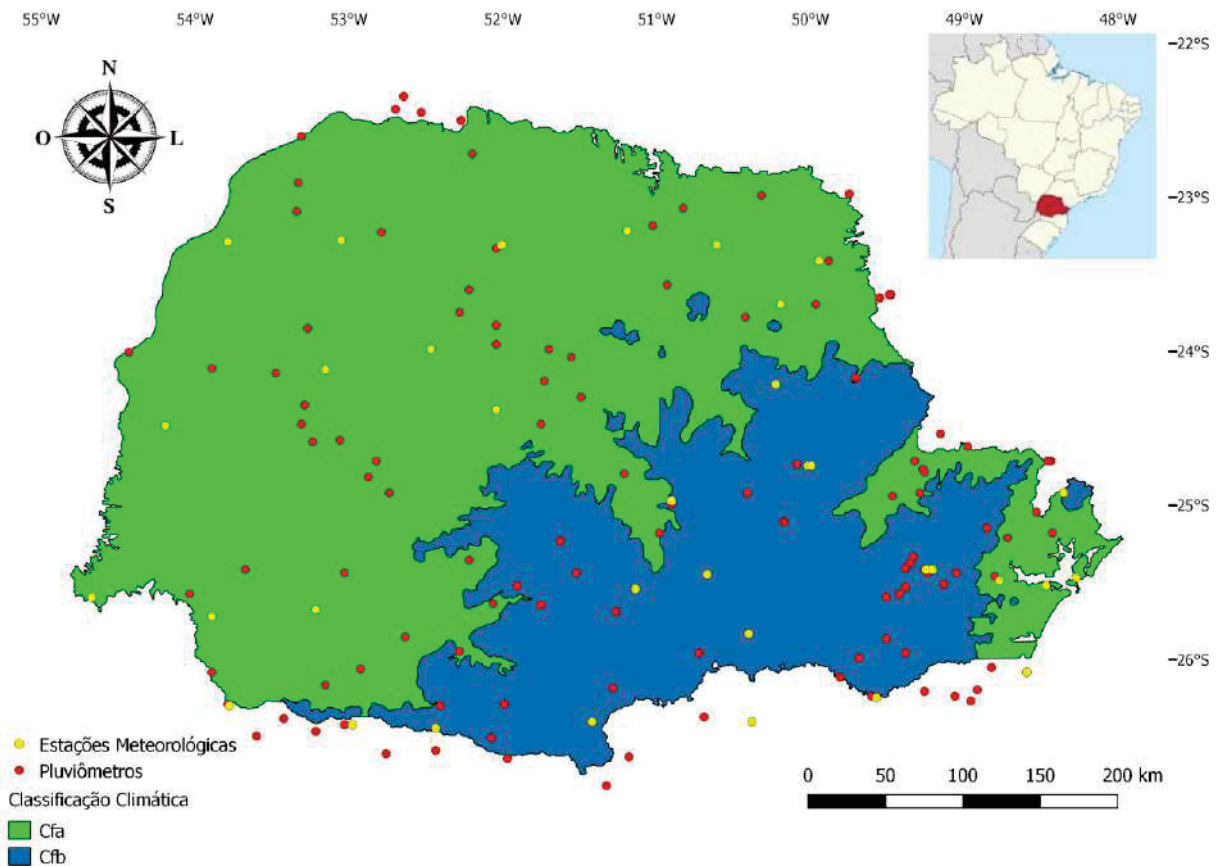
4.2.1 Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos

O Estado do Paraná está localizado na região Sul do Brasil e sua área é de 199.307,922 km². No Estado predominam dois tipos climáticos distintos, de acordo com a classificação de Köppen: Cfa e Cfb (Figura 4.1). Quase todo o Estado está sujeito à ocorrência de mais de cinco dias de geada por ano. Contudo, no sul e partes de maior altitude dos planaltos do Estado é registrado ocorrência superior a dez dias (Maack, 2012). O clima Cfa, subtropical tem boa distribuição de chuvas, temperatura média anual de 19 °C e pluviosidade de 1500 mm anuais. O clima Cfb, subtropical tem boa distribuição de chuvas durante o ano e verões amenos. A média anual das temperaturas é de 17 °C e a pluviosidade é superior a 1200 mm anuais. O clima Cwa, subtropical tem verões e invernos secos. A temperatura média anual é de 20 °C, e a pluviosidade média é de 1300 mm anuais (Alvares et al., 2013).

O conjunto de dados meteorológicos incluiu dados observados (706 estações no total) recolhidos diariamente a partir de pluviômetros, bem como estações meteorológicas convencionais e automáticas, no período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de Dezembro 2013 (34 anos) (Figura 4.1). As fontes dos dados foram o “Instituto Nacional de Meteorologia” (INMET) e “Agência Nacional de Águas” (ANA). Os dados da ANA foram limitados à precipitação (P). Os dados do INMET foram constituídos de: temperatura máxima ($T_{máx}$; °C), mínima ($T_{mín}$; °C) e média (T_{med} ; °C) do ar, umidade relativa (UR; %), velocidade do vento a 2 m de altura (u_2 ; m s⁻¹), precipitação (P ; mm), brilho solar diário (n ; horas) de estações meteorológicas convencionais e radiação solar diária (Rs ; MJ m⁻²) a partir de

estações automáticas. Não foram observados dados das estações meteorológicas com coordenadas duplicadas. Assim, não foram removidas quaisquer medidas de pluviômetros ou dados das estações meteorológicas do conjunto de dados.

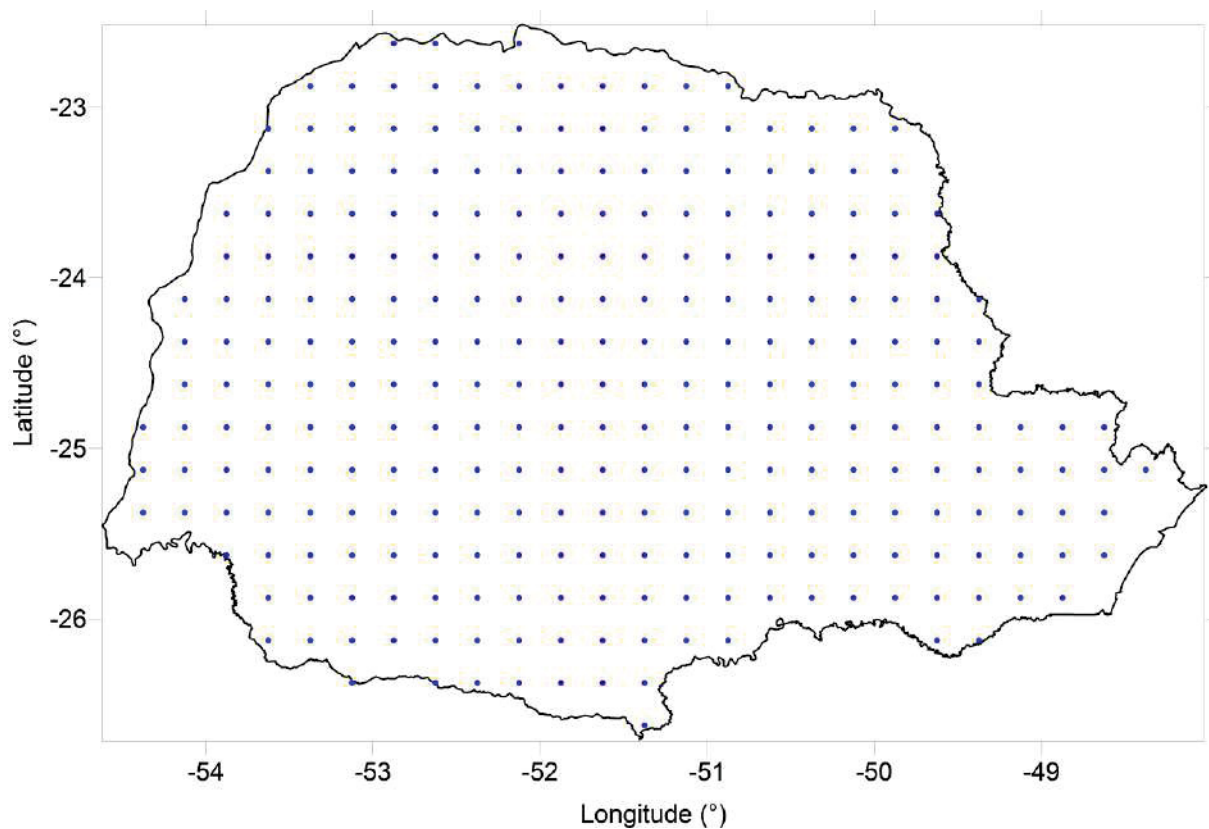
FIGURA 4.1 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN PARA O ESTADO DO PARANÁ E PLUVIÔMETROS E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS NO PRESENTE ESTUDO



FONTE: adaptado de ITCG (2006); O autor (2018).

Vários interpoladores foram testados para espacializar os dados meteorológicos: ponderação da distância inversa; *krigagem* ordinária; *spline*; interpolação natural; média aritmética. O melhor interpolador foi obtido por meio de validação cruzada, e os dados meteorológicos foram espacializados em *grid* regular de 0,25° x 0,25°, cobrindo todo o Estado do Paraná (Xavier et al., 2016). Como resultado obteve-se os dados meteorológicos (P , $T_{máx}$, $T_{mín}$, T_{med} , UR , U_2 , n , Rs) diários (34 anos) para o *grid* regular contendo 279 localidades (Figura 4.2).

FIGURA 4.2 – GRID REGULAR DE 0,25° X 0,25°, CONTENDO OS 279 PONTOS NO ESTADO DO PARANÁ, EM QUE FORAM ANALISADOS OS VALORES DIÁRIOS DE ET_o E P , AGRUPADOS EM DECÊNDIOS



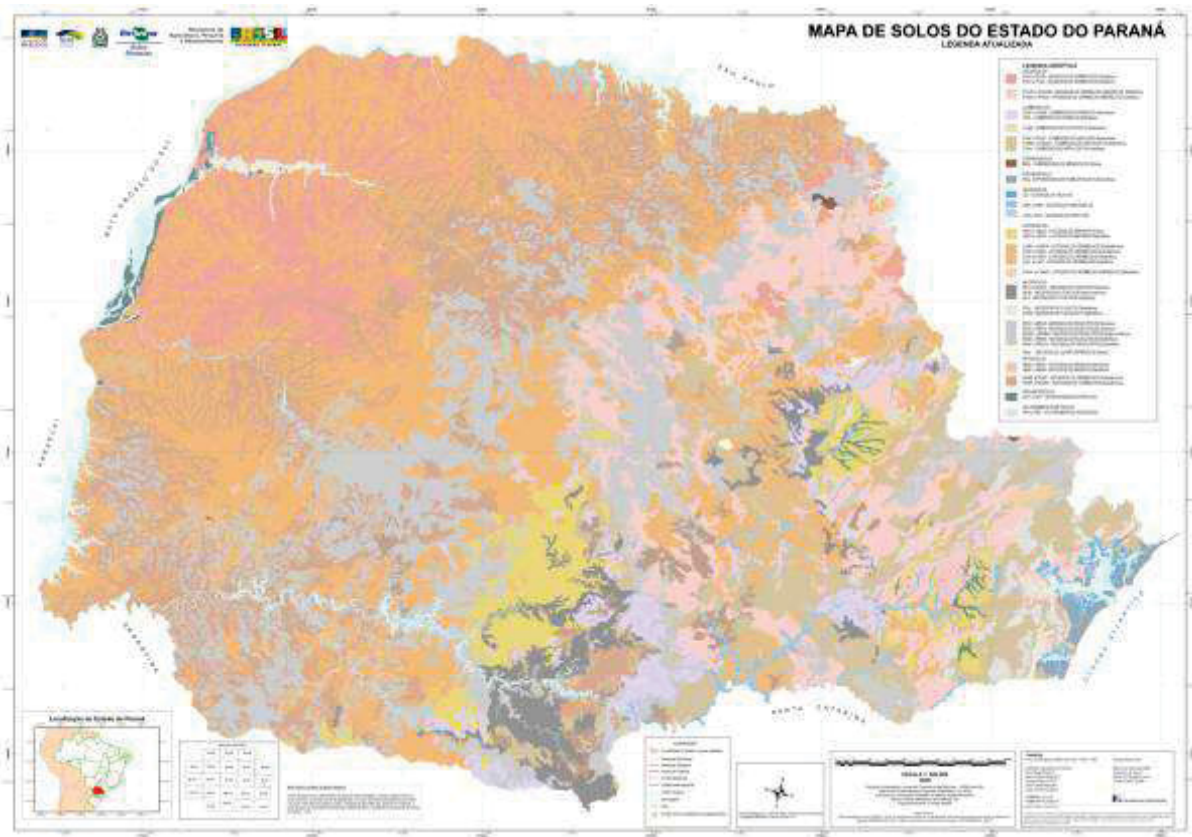
FONTE: O autor (2018).

4.2.2 Cálculo do balanço hídrico agrícola

O cálculo do *BHA* foi realizado para as culturas milho e soja com o modelo AquaCrop, versão 5.0, disponibilizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (Raes et al., 2016). Não foram considerados estresses decorrentes de salinidade e fertilidade. O *BHA* foi realizado com periodicidade diária, resultando em séries de 34 anos de dados de saída. Os dados de entrada foram divididos em categorias: climáticos, de solo e da cultura. A ET_o (dado climático) foi calculada com o método de Penman-Monteith adaptado (ASCE-EWRI, 2005; Apêndice 2). A metodologia completa utilizada para o cálculo do *BHA* no AquaCrop encontra-se no Apêndice 1.

Os parâmetros de solos (Apêndice 5 – Tabela A.5.1) foram considerados de acordo com a classificação de solos (Figura 4.3) e texturas predominantes na localidade do Estado do Paraná, onde os dados climáticos foram obtidos (Figura 4.2).

FIGURA 4.3 – MAPA DE SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: Bhering et al. (2007).

Os parâmetros das culturas milho e soja consideraram quatro períodos de desenvolvimento, conforme proposto por Allen et al. (1998), sendo que o período II (crescimento vegetativo ao início do florescimento) foi estendido ao longo de todo o ano (Apêndice 5 – Tabela A.5.2). Portanto, nos períodos I, III e IV as culturas tiveram apenas 1 dia. Assim, o período II, que é o de maior demanda hídrica, perdurou ao longo de todo o ano, nos 34 anos de *BHA* simulados.

As componentes de saída diárias do *BHA* (série de 34 anos) no AquaCrop são: evapotranspiração da cultura (*ETc*), armazenamento de água no solo na zona da raiz (*S*), evapotranspiração real (*ETr*), deficiência hídrica (*Def*), excedente hídrico (*Exc*), escoamento superficial (*ES*), infiltração de água no solo (*Inf*), drenagem profunda (*DP*), ascensão capilar (*AC*). No entanto, no presente estudo utilizou-se apenas a *ETc* e *ETr*, para determinar o risco hídrico das culturas estudadas.

4.2.3 Cálculo dos valores prováveis

Considerando os procedimentos metodológicos de Souza et al. (2013), foram realizados os seguintes passos:

- a) Agrupamento dos valores diários das componentes do *BHA* (*ETc* e *ETr*), bem como da temperatura mínima (*Tmín*) e máxima (*Tmáx*) do ar em períodos de dez dias (decêndios);
- b) Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados das séries observadas;
- c) Cálculo dos parâmetros estatísticos das funções densidade de probabilidade (*fdp*) Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme (Apêndice 3), com as séries de valores decendiais;
- d) Verificação da aderência dos valores decendiais às cinco *fdp*'s com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade;
- e) Escolha da *fdp* que melhor se ajustou a cada decêndio observado;
- f) Determinação dos valores prováveis à diferentes níveis de probabilidade de ocorrência.

Os valores diários das componentes *ETc*, *ETr*, *Tmín* e *Tmáx* foram organizados em 37 decêndios por ano. O trigésimo sétimo decêndio de cada ano foi composto pelos cinco ou seis (ano bissexto) últimos dias do ano.

Foram consideradas as *fdp*'s Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme (Apêndice 3). Os parâmetros estatísticos determinados foram: alfa e beta, para a distribuição Gama; média e desvio padrão, para a Normal; maior valor, menor valor e moda, para a Triangular; média, para a Exponencial; e maior e menor valor, para a Uniforme (Assis et al., 1996; Bussab & Morettin, 2010).

A aderência dos valores decendiais às *fdp*'s foi obtida com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. O teste avalia por meio do valor *Dmax*, o ajuste entre a distribuição de frequência acumulada teórica $F'(x)$ e outra, $F(x)$, proveniente dos dados amostrados.

$$D_{max} = \text{Max } |F(x) - F'(x)|$$

Sendo: *Dmax* – valor crítico para a estatística de Kolmogorov-Smirnov; $F(x)$ – função de distribuição de probabilidade teórica; $F'(x)$ – função de distribuição de probabilidade observada.

Para a condição “ D_{max} calculado < D_{max} tabelado” aceita-se a hipótese de que os valores da amostra ajustam-se bem à distribuição de probabilidade a 5% de significância, caso contrário, a hipótese é rejeitada.

O valor de D_{max} tabelado foi estimado utilizando as seguintes equações, conforme recomendações de Assis et al. (1996) e Souza et al. (2013):

$$D_{max} = 0,971 - 0,2388 \ln N \quad \text{Para } N < 16$$

$$D_{max} = \frac{1,37}{\sqrt{N}} \quad \text{Para } N \geq 16$$

Sendo: D_{max} – valor crítico D_{max} da estatística de Kolmogorov-Smirnov; N – número de elementos da amostra (adimensional).

Depois de testada a aderência da *fdp* que melhor se ajustou às séries de dados de ET_c , ET_r , $Tmín$ e $Tmáx$ para cada decêndio, determinou-se os valores decendiais prováveis de $Tmín$ a 50%, 75% e 90% de probabilidade, $Tmáx$ a 10%, 25% e 50%. Os valores prováveis de ET_c e ET_r a 10%, 25% e 50% também foram determinados para cada localidade (Figura 4.2):

$$Tmín_{50\%} = P(Tmín_{50\%} \in Tmín \mid Tmín_i \geq Tmín_{50\%}) = 50\%$$

$$Tmín_{75\%} = P(Tmín_{75\%} \in Tmín \mid Tmín_i \geq Tmín_{75\%}) = 75\%$$

$$Tmín_{90\%} = P(Tmín_{90\%} \in Tmín \mid Tmín_i \geq Tmín_{90\%}) = 90\%$$

$$Tmáx_{10\%} = P(Tmáx_{10\%} \in Tmáx \mid Tmáx_i \geq Tmáx_{10\%}) = 10\%$$

$$Tmáx_{25\%} = P(Tmáx_{25\%} \in Tmáx \mid Tmáx_i \geq Tmáx_{25\%}) = 25\%$$

$$Tmáx_{50\%} = P(Tmáx_{50\%} \in Tmáx \mid Tmáx_i \geq Tmáx_{50\%}) = 50\%$$

$$ETc_{10\%} = P(ETc_{10\%} \in ETc \mid ETc_i \geq ETc_{10\%}) = 10\%$$

$$ETc_{25\%} = P(ETc_{25\%} \in ETc \mid ETc_i \geq ETc_{25\%}) = 25\%$$

$$ETc_{50\%} = P(ETc_{50\%} \in ETc \mid ETc_i \geq ETc_{50\%}) = 50\%$$

$$ETr_{10\%} = P(ETr_{10\%} \in ETr \mid ETr_i \geq ETr_{10\%}) = 10\%$$

$$ETr_{25\%} = P(ETr_{25\%} \in ETr \mid ETr_i \geq ETr_{25\%}) = 25\%$$

$$ETr_{50\%} = P(ETr_{50\%} \in ETr \mid ETr_i \geq ETr_{50\%}) = 50\%$$

Logo, para cada decêndio, a $Tmín_{75\%}$ refere-se ao valor de $Tmín$ que tenha 75% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da temperatura mínima $Tmín_i$ ocorrer três vezes a cada quatro anos ou com tempo de retorno $T = 1,33$ anos, em média. Para cada decêndio, a $ETr_{25\%}$ refere-se ao valor de evapotranspiração real ETr_i que tenha 25% de probabilidade de ser igualado ou superado, o que corresponde à probabilidade da evapotranspiração

ETr_i ocorrer uma vez a cada quatro anos ou com tempo de retorno $T = 4$ anos, em média.

4.2.4 Necessidades térmicas e hídricas das culturas milho e soja

Os critérios de riscos climáticos foram estabelecidos considerando as necessidades hídricas e térmicas das culturas milho e soja, por meio dos valores prováveis de ETc , ETr , T_{\min} e T_{\max} calculados conforme o item anterior.

É importante frisar que o cálculo do *BHA* foi realizado considerando o cultivo do milho e soja ao longo de todo o ano. No entanto, na verificação dos riscos climáticos considerou-se o ciclo médio das culturas milho e soja de 130 e 120 dias, respectivamente, e período de desenvolvimento III (florescimento/enchimento de grãos) de 70-110 e 50-90 dias, respectivamente. Por exemplo: considerando a semeadura em 10 de setembro, a partir desta data conta-se 120 dias para o ciclo da soja, e o período de desenvolvimento III ocorrerá entre 30 de outubro e 11 de dezembro.

Em relação ao estresse térmico considerou-se que temperaturas (T) prováveis, fora do intervalo ideal (temperatura base inferior e superior), no período de desenvolvimento III (florescimento/enchimento de grãos), são críticas para as culturas e devem ser evitadas, conforme considerado por MAPA (2017):

- Milho: $15,5\text{ °C} < T < 33\text{ °C}$;
- Soja: $13\text{ °C} < T < 40\text{ °C}$.

Os parâmetros mínimos de necessidade hídrica para cada cultura foram calculados por meio do Índice de Satisfação de Necessidade de Água (*ISNA*), um indicador na penalização que varia de zero a 1. O *ISNA* representa a fração entre a quantidade real de água consumida pela planta e a quantidade que seria demandada para garantir a máxima produtividade.

$$ISNA = \frac{\sum_{i=1}^n ETr_i}{\sum_{i=1}^n ETc_i}$$

Sendo: *ISNA* – Índice de Satisfação das Necessidades de Água (adimensional); ETr_i – evapotranspiração real no i -ésimo decêndio (mm decêndio^{-1}); ETc_i –

evapotranspiração da cultura no i -ésimo decêndio (mm decêndio^{-1}); n – decêndio (adimensional).

Os $ISNA$'s decendiais foram calculados com os valores prováveis de ET_c e ET_r , conforme o item anterior.

Em relação à disponibilidade hídrica para a cultura do milho foi adotado o critério proposto por Assad & Sano (1998), e utilizado pelo MAPA (2017):

- $ISNA \geq 0,55$: Região agroclimática favorável, com pequeno risco climático;
- $0,55 > ISNA \geq 0,45$: Região agroclimática intermediária, com risco médio;
- $ISNA < 0,45$: Região agroclimática desfavorável, com alto risco climático e elevado déficit hídrico.

Em relação à disponibilidade hídrica para a soja foi adotado o critério proposto por Cunha et al. (2001) e Farias et al. (2001), e também utilizado pelo MAPA (2017):

- $ISNA \geq 0,65$: região agroclimática favorável com pequeno risco climático;
- $0,65 > ISNA \geq 0,55$: região agroclimática intermediária com risco médio;
- $ISNA < 0,55$: região agroclimática desfavorável com alto risco climático e elevado déficit hídrico.

Os $ISNA$'s das culturas milho e soja foram contabilizados na fase mais crítica das culturas, no período de desenvolvimento III (florescimento/enchimento de grãos).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Necessidade térmica provável das culturas milho e soja no Estado do Paraná

A fdp Normal teve o melhor ajustamento em mais da metade dos decêndios para $T_{mín}$ e $T_{máx}$, enquanto o percentual de melhores ajustes obtidos com as fdp 's Exponencial e Uniforme foram desprezíveis (Tabela 4.1).

Araújo et al. (2010a) testaram a aderência das fdp 's Beta, Gama, Gumbel I, Log Normal, Normal e Weibull à $T_{mín}$ e $T_{máx}$ no Ceará (tipo climático BSwH), e concluíram que a Log Normal e Normal são as que melhor ajustaram para diferentes períodos de tempo. Blain et al. (2009) e Blain (2010) também obtiveram que a fdp Normal melhor se ajustou aos dados de $T_{mín}$ e $T_{máx}$ em São Paulo (tipo climático Cfa).

TABELA 4.1 – FREQUÊNCIA DE MELHORES AJUSTES OBTIDOS COM AS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE TESTADAS (N – NORMAL; G – GAMA; T – TRIANGULAR; E – EXPONENCIAL; U – UNIFORME), PARA TEMPERATURA MÍNIMA E MÁXIMA, NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndios	----- Frequência de melhores ajustes das <i>fdp</i> 's (unidades) -----									
	----- Temperatura Mínima (°C) -----					----- Temperatura Máxima (°C) -----				
	N	G	T	E	U	N	G	T	E	U
1	178	82	18	0	1	206	31	39	0	3
2	147	58	62	0	12	102	142	33	0	2
3	202	55	22	0	0	220	52	7	0	0
4	169	61	49	0	0	181	72	26	0	0
5	181	72	26	0	0	195	65	19	0	0
6	171	37	70	0	1	177	88	14	0	0
7	195	52	30	0	2	119	111	13	0	36
8	199	71	9	0	0	202	61	16	0	0
9	194	37	43	0	5	63	170	46	0	0
10	210	61	5	0	3	192	53	17	0	17
11	222	13	44	0	0	129	117	33	0	0
12	159	106	14	0	0	115	137	27	0	0
13	213	28	38	0	0	194	57	26	0	2
14	231	40	8	0	0	165	106	7	0	1
15	211	29	12	0	27	152	73	54	0	0
16	170	88	21	0	0	231	20	28	0	0
17	76	147	5	0	51	110	82	11	0	76
18	261	5	13	0	0	99	158	9	0	13
19	241	5	33	0	0	216	36	11	0	16
20	184	65	25	0	5	113	141	2	0	23
21	163	4	111	0	1	171	49	41	0	18
22	98	142	5	0	34	141	122	16	0	0
23	215	15	46	0	3	82	149	21	0	27
24	244	19	14	0	2	134	37	106	0	2
25	232	44	3	0	0	48	112	15	0	104
26	229	6	44	0	0	160	90	29	0	0
27	212	50	17	0	0	115	142	22	0	0
28	134	78	18	0	49	82	137	59	0	1
29	194	63	10	0	12	124	123	5	0	27
30	205	50	24	0	0	145	97	35	0	2
31	152	68	41	0	18	149	111	19	0	0
32	189	52	34	0	4	115	129	30	0	5
33	168	102	9	0	0	197	66	16	0	0
34	120	126	33	0	0	147	81	13	0	38
35	200	56	22	0	1	179	77	23	0	0
36	146	87	12	0	34	107	88	2	0	82
37	69	171	11	0	28	65	167	47	0	0
Soma	6784	2245	1001	0	293	5342	3549	937	0	495
Percentual (%)	65,72	21,75	9,70	0,00	2,84	51,75	34,38	9,08	0,00	4,80

FONTE: O autor (2018).

Depois da Normal, a Gama teve destaque entre as *fdp*'s, principalmente para a *T_{máx}*. Araújo et al. (2010b) comentam que dependendo de seus parâmetros, a *fdp* Gama possui grande diversidade de forma e escala, muitas vezes se aproxima da *fdp* Normal.

Como os dados de temperatura geralmente são normais, não houve variação entre as temperaturas médias e a 50% de probabilidade de ocorrência.

Também não houve muita variação entre os diferentes níveis de probabilidade de ocorrência das temperaturas (Tabela 4.2).

TABELA 4.2 – VALORES PROVÁVEIS MÉDIOS DE TEMPERATURA MÍNIMA ($T_{mín}$; °C) E MÁXIMA ($T_{máx}$; °C) OBTIDAS PARA DIFERENTES NÍVEIS DE PROBABILIDADE NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Média $T_{mín}$ (°C) provável				Média $T_{máx}$ (°C) provável			
	$T_{mín_{média}}$	$T_{mín_{50\%}}$	$T_{mín_{75\%}}$	$T_{mín_{90\%}}$	$T_{máx_{média}}$	$T_{máx_{50\%}}$	$T_{máx_{25\%}}$	$T_{máx_{10\%}}$
1 (01/jan)	18,75	18,74	17,87	17,10	29,06	29,09	30,21	31,20
2 (11/jan)	18,84	18,86	18,04	17,32	29,12	29,09	30,07	30,95
3 (21/jan)	18,97	18,96	18,26	17,63	28,91	28,91	29,96	30,91
4 (31/jan)	19,02	18,99	18,24	17,60	29,12	29,10	30,30	31,39
5 (10/fev)	18,80	18,80	18,07	17,42	28,71	28,70	29,70	30,59
6 (20/fev)	18,97	19,00	18,17	17,44	29,24	29,23	30,22	31,10
7 (02/mar)	18,51	18,51	17,69	16,97	29,21	29,20	30,44	31,49
8 (12/mar)	17,92	17,92	17,07	16,32	28,34	28,33	29,49	30,53
9 (22/mar)	17,49	17,50	16,49	15,59	28,15	28,14	29,25	30,25
10 (01/abr)	16,82	16,81	15,67	14,67	27,56	27,56	28,86	29,98
11 (11/abr)	15,95	15,96	14,60	13,38	26,61	26,55	28,00	29,33
12 (21/abr)	15,28	15,24	14,03	12,97	25,65	25,62	26,91	28,08
13 (01/mai)	13,33	13,31	11,96	10,76	24,10	24,11	25,40	26,56
14 (11/mai)	13,06	13,04	11,62	10,36	23,20	23,17	24,51	25,73
15 (21/mai)	11,99	11,97	10,48	9,21	22,30	22,31	23,75	25,05
16 (31/mai)	11,18	11,10	9,18	7,53	21,59	21,61	23,53	25,22
17 (10/jun)	11,35	11,26	9,80	8,64	22,08	22,07	23,80	25,19
18 (20/jun)	11,10	11,10	9,80	8,63	21,58	21,54	22,81	23,95
19 (30/jun)	11,45	11,47	10,10	8,88	22,18	22,18	23,76	25,14
20 (10/jul)	10,41	10,38	8,72	7,29	21,68	21,63	23,56	25,28
21 (20/jul)	10,20	10,32	8,54	6,95	22,15	22,21	24,05	25,62
22 (30/jul)	10,76	10,68	9,31	8,18	23,11	23,06	24,70	26,21
23 (09/ago)	11,57	11,63	9,92	8,39	23,61	23,56	25,19	26,62
24 (19/ago)	12,32	12,32	11,02	9,86	24,82	24,96	26,76	28,22
25 (29/ago)	12,64	12,62	11,15	9,84	24,93	24,84	27,10	28,87
26 (08/set)	13,32	13,35	12,02	10,83	25,29	25,30	27,32	29,14
27 (18/set)	13,41	13,40	12,24	11,20	24,79	24,72	26,45	28,04
28 (28/set)	14,47	14,48	13,56	12,80	25,59	25,51	26,92	28,20
29 (08/out)	15,38	15,36	14,17	13,12	26,45	26,42	27,91	29,20
30 (18/out)	15,72	15,72	14,64	13,68	26,70	26,67	27,90	29,01
31 (28/out)	16,35	16,35	15,22	14,25	27,55	27,54	28,68	29,71
32 (07/nov)	16,60	16,60	15,50	14,52	27,80	27,75	29,09	30,29
33 (17/nov)	17,11	17,08	16,13	15,29	28,53	28,53	29,57	30,50
34 (27/nov)	17,54	17,51	16,75	16,08	28,65	28,65	29,61	30,43
35 (07/dez)	18,14	18,14	17,35	16,65	28,69	28,68	29,81	30,82
36 (17/dez)	18,28	18,27	17,39	16,65	29,01	29,00	30,13	31,03
37 (27/dez)	18,64	18,58	17,06	15,80	28,99	28,88	30,95	32,86
Média	15,18	15,17	14,00	12,97	26,08	26,07	27,48	28,72
Soma	561,66	561,35	517,86	479,79	965,07	964,44	1016,62	1062,71

FONTE: O autor (2018).

A $T_{m\acute{a}x}$ não ocasionou risco climático às culturas milho e soja, pois o MAPA (2017) estabeleceu alto risco somente para temperaturas acima de 33 e 40 °C, respectivamente. Valores dessa magnitude dificilmente ocorrem em estudos probabilísticos envolvendo séries históricas longas (Perkins et al., 2007).

No entanto, a $T_{mín}$ teve muita influência no risco climático das culturas milho e soja no Paraná (Tabela 4.3). A $T_{mín}$ influencia diretamente na fisiologia das culturas analisadas, apresentando máximo crescimento entre 20 a 30 °C e bastante sensibilidade às temperaturas baixas (MAPA, 2017). Verificou-se, em média, que o milho foi mais sensível ao risco térmico, apesar da $T_{mín}$ da soja ser menor. Isso ocorreu devido à fase reprodutiva do milho ser mais tardia.

Franchini et al. (2016) verificaram influência da $T_{mín}$ na produtividade da soja devido à altitude. A relação existe, pois há redução das temperaturas do ar à medida que ocorre o aumento da altitude. Os autores encontraram fraca correlação ($R^2 = 0,15$) entre altitude e produtividade média de grãos de soja no Paraná. Porém, houve tendência de maiores produtividades de soja com o incremento da altitude. A relação não é tão evidente devido a outros fatores (hídricos, solos e tecnológicos).

TABELA 4.3 – RISCO CLIMÁTICO TÉRMICO⁽¹⁾, CONFORME A TEMPERATURA MÍNIMA (T_{\min}) PROVÁVEL MÉDIA, PARA AS CULTURAS MILHO⁽²⁾ E SOJA⁽³⁾, NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Probabilidade da T_{\min} para o milho								Probabilidade da T_{\min} para a soja							
	$T_{\min_{\text{média}}}$		$T_{\min_{50\%}}$		$T_{\min_{75\%}}$		$T_{\min_{90\%}}$		$T_{\min_{\text{média}}}$		$T_{\min_{50\%}}$		$T_{\min_{75\%}}$		$T_{\min_{90\%}}$	
	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D
1 (01/jan)	X		X			X		X	X		X		X		X	
2 (11/jan)		X		X		X		X	X		X		X		X	
3 (21/jan)		X		X		X		X	X		X		X		X	
4 (31/jan)		X		X		X		X	X		X		X			X
5 (10/fev)		X		X		X		X	X		X			X		X
6 (20/fev)		X		X		X		X	X		X			X		X
7 (02/mar)		X		X		X		X		X		X		X		X
8 (12/mar)		X		X		X		X		X		X		X		X
9 (22/mar)		X		X		X		X		X		X		X		X
10 (01/abr)		X		X		X		X		X		X		X		X
11 (11/abr)		X		X		X		X		X		X		X		X
12 (21/abr)		X		X		X		X		X		X		X		X
13 (01/mai)		X		X		X		X		X		X		X		X
14 (11/mai)		X		X		X		X		X		X		X		X
15 (21/mai)		X		X		X		X		X		X		X		X
16 (31/mai)		X		X		X		X		X		X		X		X
17 (10/jun)		X		X		X		X		X		X		X		X
18 (20/jun)		X		X		X		X		X		X		X		X
19 (30/jun)		X		X		X		X		X		X		X		X
20 (10/jul)		X		X		X		X		X		X		X		X
21 (20/jul)		X		X		X		X	X		X			X		X
22 (30/jul)		X		X		X		X	X		X			X		X
23 (09/ago)	X		X			X		X	X		X		X			X
24 (19/ago)	X		X			X		X	X		X		X			X
25 (29/ago)	X		X			X		X	X		X		X			X
26 (08/set)	X		X		X			X	X		X		X			X
27 (18/set)	X		X		X		X		X		X		X		X	
28 (28/set)	X		X		X		X		X		X		X		X	
29 (08/out)	X		X		X		X		X		X		X		X	
30 (18/out)	X		X		X		X		X		X		X		X	
31 (28/out)	X		X		X		X		X		X		X		X	
32 (07/nov)	X		X		X		X		X		X		X		X	
33 (17/nov)	X		X		X		X		X		X		X		X	
34 (27/nov)	X		X		X		X		X		X		X		X	
35 (07/dez)	X		X		X		X		X		X		X		X	
36 (17/dez)	X		X		X		X		X		X		X		X	
37 (27/dez)	X		X		X		X		X		X		X		X	

FONTE: O autor (2018).

⁽¹⁾ F – Favorável; e, D – Desfavorável.

⁽²⁾ $T_{\min} \geq 15,5^\circ\text{C}$: Favorável (F) à semedura; $T_{\min} < 15,5^\circ\text{C}$: Desfavorável (D) à semedura. Considerando o período de desenvolvimento III – florescimento/enchimento de grãos (70-110 dias).

⁽³⁾ $T_{\min} \geq 13^\circ\text{C}$: Favorável (F) à semedura; $T_{\min} < 13^\circ\text{C}$: Desfavorável à semedura. Considerando o período de desenvolvimento III – florescimento/enchimento de grãos (50-90 dias).

4.3.2 Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos

Houve variação entre os *ISNA*'s para as culturas milho e soja ao longo dos decêndios, apesar da média anual ser muito parecida (Tabela 4.4).

TABELA 4.4 – VALORES PROVÁVEIS MÉDIOS DE ÍNDICE DE SATISFAÇÃO DAS NECESSIDADES DE ÁGUA (*ISNA*), PARA AS CULTURAS MILHO E SOJA, NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Probabilidade do <i>ISNA</i> para o milho				Probabilidade do <i>ISNA</i> para a soja			
	<i>ISNA</i> _{médio}	<i>ISNA</i> _{50%}	<i>ISNA</i> _{25%}	<i>ISNA</i> _{10%}	<i>ISNA</i> _{médio}	<i>ISNA</i> _{50%}	<i>ISNA</i> _{25%}	<i>ISNA</i> _{10%}
1 (01/jan)	0,73	0,74	0,75	0,76	0,34	0,32	0,37	0,43
2 (11/jan)	0,74	0,74	0,77	0,78	0,38	0,37	0,42	0,46
3 (21/jan)	0,74	0,75	0,80	0,82	0,64	0,64	0,65	0,66
4 (31/jan)	0,75	0,76	0,78	0,79	0,78	0,79	0,80	0,80
5 (10/fev)	0,78	0,78	0,82	0,84	0,79	0,79	0,82	0,83
6 (20/fev)	0,78	0,78	0,83	0,86	0,78	0,78	0,83	0,86
7 (02/mar)	0,68	0,69	0,73	0,76	0,68	0,69	0,73	0,76
8 (12/mar)	0,68	0,69	0,74	0,78	0,68	0,68	0,75	0,79
9 (22/mar)	0,66	0,67	0,72	0,75	0,66	0,67	0,72	0,75
10 (01/abr)	0,64	0,65	0,72	0,77	0,64	0,64	0,72	0,77
11 (11/abr)	0,64	0,65	0,70	0,73	0,64	0,65	0,70	0,73
12 (21/jan)	0,68	0,69	0,74	0,77	0,70	0,71	0,75	0,78
13 (01/mai)	0,64	0,65	0,71	0,74	0,65	0,66	0,72	0,75
14 (11/mai)	0,68	0,69	0,76	0,81	0,69	0,69	0,77	0,82
15 (21/mai)	0,72	0,73	0,78	0,81	0,72	0,73	0,78	0,81
16 (31/mai)	0,72	0,73	0,76	0,78	0,72	0,73	0,76	0,77
17 (10/jun)	0,71	0,72	0,75	0,77	0,71	0,72	0,75	0,77
18 (20/jun)	0,74	0,75	0,79	0,82	0,74	0,75	0,80	0,83
19 (30/jun)	0,70	0,71	0,75	0,77	0,71	0,71	0,75	0,77
20 (10/jul)	0,68	0,68	0,72	0,75	0,69	0,69	0,73	0,76
21 (20/jul)	0,65	0,65	0,71	0,75	0,65	0,65	0,71	0,75
22 (30/jul)	0,59	0,59	0,65	0,68	0,60	0,60	0,66	0,69
23 (09/ago)	0,50	0,50	0,56	0,61	0,50	0,50	0,57	0,61
24 (19/ago)	0,49	0,47	0,58	0,66	0,47	0,45	0,56	0,65
25 (29/ago)	0,53	0,53	0,63	0,70	0,48	0,48	0,58	0,65
26 (08/set)	0,57	0,58	0,63	0,66	0,53	0,54	0,61	0,64
27 (18/set)	0,66	0,66	0,69	0,72	0,66	0,66	0,71	0,74
28 (28/set)	0,59	0,59	0,63	0,65	0,71	0,71	0,73	0,75
29 (08/out)	0,49	0,44	0,57	0,71	0,77	0,78	0,81	0,84
30 (18/out)	0,44	0,40	0,50	0,61	0,78	0,78	0,79	0,80
31 (28/out)	0,40	0,36	0,45	0,55	0,67	0,66	0,69	0,71
32 (07/nov)	0,36	0,33	0,40	0,46	0,45	0,43	0,50	0,58
33 (17/nov)	0,34	0,32	0,38	0,43	0,39	0,36	0,43	0,51
34 (27/nov)	0,32	0,30	0,36	0,41	0,36	0,32	0,40	0,49
35 (07/dez)	0,31	0,30	0,35	0,40	0,34	0,32	0,38	0,45
36 (17/dez)	0,32	0,31	0,36	0,40	0,33	0,31	0,37	0,44
37 (27/dez)	0,63	0,64	0,63	0,62	0,33	0,31	0,36	0,41
Média	0,60	0,60	0,65	0,69	0,60	0,60	0,65	0,69

FONTE: O autor (2018).

Geralmente, a cultura da soja é mais sensível ao estresse hídrico que o milho (Tabela 4.4). *ISNA*'s menores que 0,50 para soja, durante a floração e o

enchimento de grãos (MAPA, 2017), provocam alterações fisiológicas na planta, como fechamento estomático e enrolamento de folhas, aumentando a queda prematura de flores, abortamento de vagens e o chochamento de grãos (Farias et al., 2009).

Em média, o risco hídrico de se plantar milho e soja no inverno foi alto, devido à baixa precipitação da estação, o que ocasionou o deslocamento da semeadura para estações mais quentes e úmidas (Tabela 4.5).

É importante frisar que os períodos favoráveis não indicam, necessariamente, períodos de semeadura para obtenção dos maiores rendimentos de grãos, mas sim, aqueles em que há menores probabilidades de perdas por déficit hídrico. Além disso, ressalta-se que o *ISNA* se trata de um zoneamento de risco climático e não de aptidão agrícola. Dessa forma, nem todas as localidades favoráveis são aptas ao cultivo das culturas milho e soja, pois, além da disponibilidade hídrica, outros fatores devem ser considerados para avaliar a viabilidade da semeadura culturas analisadas (Farias et al., 2009).

TABELA 4.5 – RISCO CLIMÁTICO HÍDRICO⁽¹⁾, CONFORME O ÍNDICE DE SATISFAÇÃO DAS NECESSIDADES DE ÁGUA (*ISNA*) PROVÁVEL MÉDIO, PARA AS CULTURAS MILHO⁽²⁾ E SOJA⁽³⁾, NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Probabilidade do <i>ISNA</i> para o milho												Probabilidade do <i>ISNA</i> para a soja											
	<i>ISNA</i> _{médio}			<i>ISNA</i> _{50%}			<i>ISNA</i> _{25%}			<i>ISNA</i> _{10%}			<i>ISNA</i> _{médio}			<i>ISNA</i> _{50%}			<i>ISNA</i> _{25%}			<i>ISNA</i> _{10%}		
	F	I	D	F	I	D	F	I	D	F	I	D	F	I	D	F	I	D	F	I	D	F	I	D
1 (01/jan)	X			X			X			X			X			X			X			X		
2 (11/jan)	X			X			X			X			X			X			X			X		
3 (21/jan)	X			X			X			X			X			X			X			X		
4 (31/jan)	X			X			X			X			X			X			X			X		
5 (10/fev)	X			X			X			X			X			X			X			X		
6 (20/fev)	X			X			X			X			X			X			X			X		
7 (02/mar)	X			X			X			X			X			X			X			X		
8 (12/mar)	X			X			X			X			X			X			X			X		
9 (22/mar)	X			X			X			X			X			X			X			X		
10 (01/abr)	X			X			X			X			X			X			X			X		
11 (11/abr)	X			X			X			X			X			X			X			X		
12 (21/abr)	X			X			X			X			X			X			X			X		
13 (01/mai)		X			X		X			X			X			X			X			X		
14 (11/mai)		X			X		X			X			X			X			X			X		
15 (21/mai)		X			X		X			X				X		X			X			X		
16 (31/mai)		X			X		X			X				X		X			X			X		
17 (10/jun)		X			X		X			X				X		X			X			X		
18 (20/jun)		X			X		X			X				X		X			X			X		
19 (30/jun)			X			X	X			X				X		X			X			X		
20 (10/jul)			X			X		X		X				X		X			X			X		
21 (20/jul)			X			X		X	X					X		X			X			X		
22 (30/jul)			X			X		X		X	X			X		X			X			X		
23 (09/ago)			X			X		X		X	X			X		X			X			X		
24 (19/ago)			X			X		X		X				X		X		X		X			X	
25 (29/ago)			X			X		X		X				X		X			X		X		X	
26 (08/set)			X			X		X		X				X		X			X			X		
27 (18/set)			X			X		X		X				X		X			X			X		
28 (28/set)			X			X		X		X				X		X			X			X		
29 (08/out)			X			X		X		X				X		X			X			X		
30 (18/out)	X			X			X			X				X		X			X			X		
31 (28/out)	X			X			X			X				X		X			X			X		
32 (07/nov)	X			X			X			X				X		X			X			X		
33 (17/nov)	X			X			X			X				X		X			X			X		
34 (27/nov)	X			X			X			X				X		X			X			X		
35 (07/dez)	X			X			X			X		X		X		X			X			X		
36 (17/dez)	X			X			X			X		X		X		X			X			X		
37 (27/dez)	X			X			X			X		X		X		X			X			X		

FONTE: O autor (2018).

⁽¹⁾ F – Favorável; e, D – Desfavorável.

⁽²⁾ *ISNA* ≥ 0,55 – Favorável (F); 0,45 ≤ *ISNA* < 0,55 – Intermediário (I); *ISNA* < 0,45 – Desfavorável (D). Considerando o período de desenvolvimento III – florescimento/enchimento de grãos (70-110 dias).

⁽³⁾ *ISNA* ≥ 0,60 – Favorável (F); 0,50 ≤ *ISNA* < 0,60 – Intermediário (I); *ISNA* < 0,50 – Desfavorável (D). Considerando o período de desenvolvimento III – florescimento/enchimento de grãos (50-90 dias).

4.3.3 Caracterização da área de estudo e dados meteorológicos

De acordo com Franchini et al. (2016), os valores críticos para os riscos hídricos e térmicos devem ser analisados conjuntamente, mas por diversas vezes se mostram antagônicos. Baixas temperaturas propiciam menor ET_r , reduzindo a probabilidade de déficit hídrico, o qual tem maior influência no potencial produtivo da soja. Por outro lado, a temperatura tem maior influência no milho, sendo fator primordial para haver uma ou duas safras anuais.

Compilando as informações de riscos climáticos, térmicos e hídricos, a restrição à semeadura de milho e soja foi maior, se intensificando (Tabela 4.6). Verificou-se, em média, que nos decêndios 30 (18 out.) e 35 (07/dez.) iniciam o período favorável à semeadura do milho e soja no Paraná, respectivamente, persistindo até meados de Janeiro.

O zoneamento agrícola estabelecido pelo IAPAR foi menos restritivo tanto para o milho (verão) quanto para a soja, o que tornou maior o período (janela) de semeadura (Figura 4.4). Os riscos climáticos do presente trabalho foram desfavoráveis, sobretudo, em agosto e setembro para o milho, e em outubro e novembro para soja.

Segundo a Agência de Defesa Sanitária do Paraná, normalmente a semeadura da soja no Paraná inicia em setembro, quando cessa o vazio sanitário no Estado, período em que não deve ser plantada soja em nenhuma localidade, como medida fitossanitária. De acordo com o Órgão, o vazio sanitário da soja em 2017 foi de 10 de junho a 10 de setembro, e o prazo final para semeadura dia 31 de dezembro (ADAPAR, 2017).

TABELA 4.6 – RISCO CLIMÁTICO TÉRMICO E HÍDRICO⁽¹⁾, CONFORME A TEMPERATURA MÍNIMA ($T_{mín}$) E O ÍNDICE DE SATISFAÇÃO DAS NECESSIDADES DE ÁGUA ($ISNA$) PROVÁVEIS MÉDIOS, PARA AS CULTURAS MILHO⁽²⁾ E SOJA⁽³⁾, NO ESTADO DO PARANÁ

Decêndio	Probabilidade da $T_{mín}$ para o milho								Probabilidade da $T_{mín}$ para a soja							
	$T_{mín_{média}}$		$T_{mín_{50\%}}$		$T_{mín_{75\%}}$		$T_{mín_{90\%}}$		$T_{mín_{média}}$		$T_{mín_{50\%}}$		$T_{mín_{75\%}}$		$T_{mín_{90\%}}$	
	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D
1 (01/jan)	X		X				X		X		X		X		X	
2 (11/jan)		X		X		X		X	X		X		X		X	
3 (21/jan)		X		X		X		X	X		X		X		X	
4 (31/jan)		X		X		X		X	X		X		X			X
5 (10/fev)		X		X		X		X	X		X			X		X
6 (20/fev)		X		X		X		X	X		X			X		X
7 (02/mar)		X		X		X		X		X		X		X		X
8 (12/mar)		X		X		X		X		X		X		X		X
9 (22/mar)		X		X		X		X		X		X		X		X
10 (01/abr)		X		X		X		X		X		X		X		X
11 (11/abr)		X		X		X		X		X		X		X		X
12 (21/jan)		X		X		X		X		X		X		X		X
13 (01/mai)		X		X		X		X		X		X		X		X
14 (11/mai)		X		X		X		X		X		X		X		X
15 (21/mai)		X		X		X		X		X		X		X		X
16 (31/mai)		X		X		X		X		X		X		X		X
17 (10/jun)		X		X		X		X		X		X		X		X
18 (20/jun)		X		X		X		X		X		X		X		X
19 (30/jun)		X		X		X		X		X		X		X		X
20 (10/jul)		X		X		X		X		X		X		X		X
21 (20/jul)		X		X		X		X	X		X			X		X
22 (30/jul)		X		X		X		X	X		X			X		X
23 (09/ago)		X		X		X		X	X		X		X			X
24 (19/ago)		X		X		X		X		X		X	X			X
25 (29/ago)		X		X		X		X		X		X		X		X
26 (08/set)		X		X		X		X		X		X		X		X
27 (18/set)		X		X		X		X		X		X		X		X
28 (28/set)		X		X		X		X		X		X		X		X
29 (08/out)		X		X		X		X		X		X		X		X
30 (18/out)	X		X		X		X			X		X		X		X
31 (28/out)	X		X		X		X			X		X		X		X
32 (07/nov)	X		X		X		X			X		X		X		X
33 (17/nov)	X		X		X		X			X		X		X		X
34 (27/nov)	X		X		X		X			X		X		X		X
35 (07/dez)	X		X		X		X		X		X		X		X	
36 (17/dez)	X		X		X		X		X		X		X		X	
37 (27/dez)	X		X		X		X		X		X		X		X	

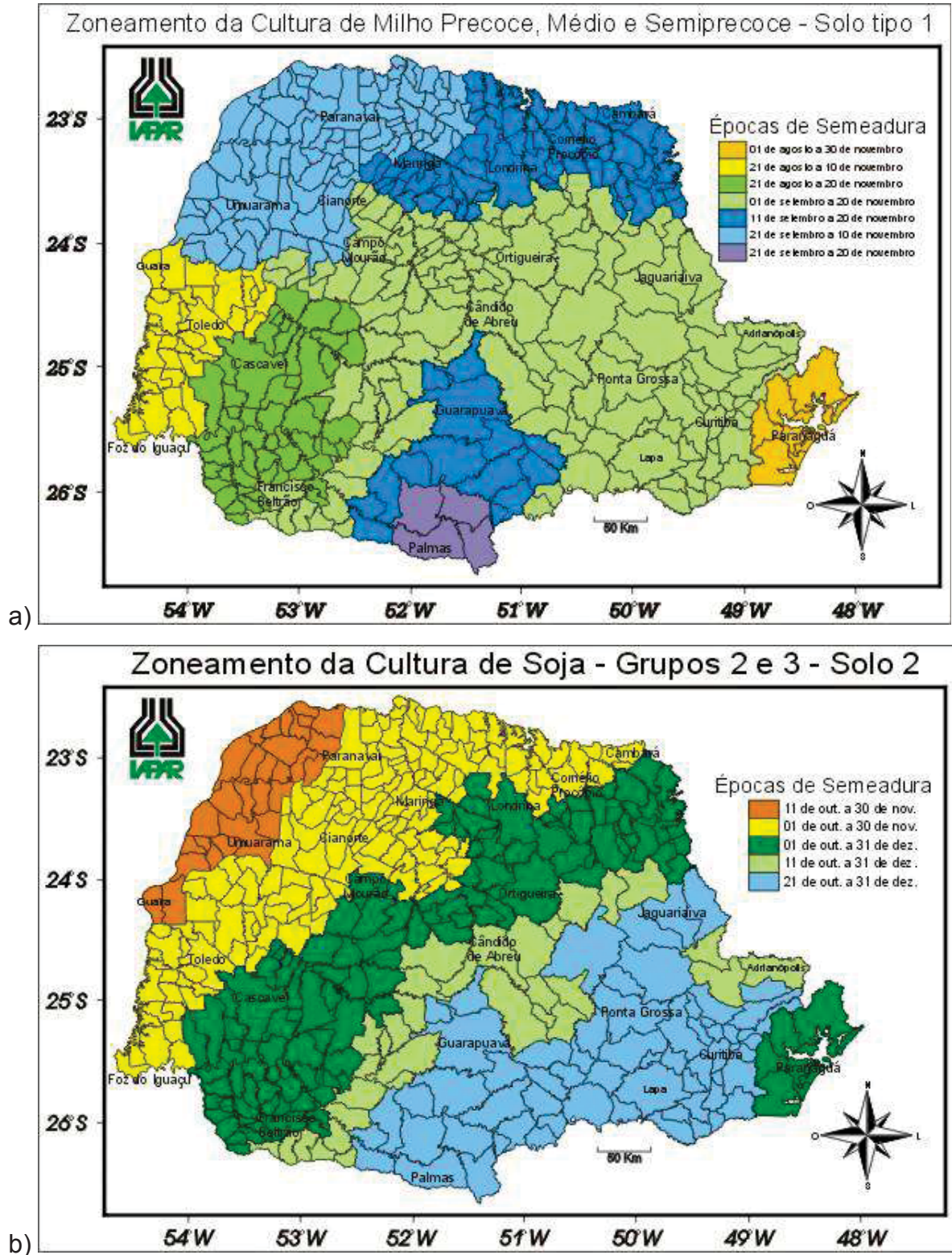
FONTE: O autor (2018).

⁽¹⁾ F – Favorável; e, D – Desfavorável.

⁽²⁾ $T_{mín} \geq 15,5^{\circ}\text{C}$: Favorável (F) à semedura; $T_{mín} < 15,5^{\circ}\text{C}$: Desfavorável (D) à semedura. $0,45 \leq ISNA < 1,00$ – Favorável (F); $ISNA < 0,45$ – Desfavorável (D). Considerando o período de desenvolvimento III – florescimento/enchimento de grãos (70-110 dias).

⁽³⁾ $T_{mín} \geq 13^{\circ}\text{C}$: Favorável (F) à semedura; $T_{mín} < 13^{\circ}\text{C}$: Desfavorável à semedura. $0,50 \leq ISNA < 1,00$ – Favorável (F); $ISNA < 0,50$ – Desfavorável (D). Considerando o período de desenvolvimento III – florescimento/enchimento de grãos (50-90 dias).

FIGURA 4.4 – ZONEAMENTO AGRÍCOLA PARA O ESTADO DO PARANÁ PROPOSTO PELO IAPAR, SENDO: a) MILHO; E, b) SOJA



FONTE: Caramori (2003).

O zoneamento agrícola do MAPA é elaborado anualmente e a disponibilidade da informação é realizada por meio de portarias ou interface gráfica de mapas, chamada de Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (Agritempo), constituindo plataforma de análise de zoneamento climático (Agritempo, 2017). No entanto, para cada decêndio existe um mapa demonstrando se o município é apto ou não à semeadura da cultura (Figura 4.5). A informação disponibilizada pelo MAPA não compila todas as informações em um único mapa de zoneamento agrícola, apenas estabelece em cada município a possibilidade de se semear determinada cultura de acordo com o decêndio desejado.

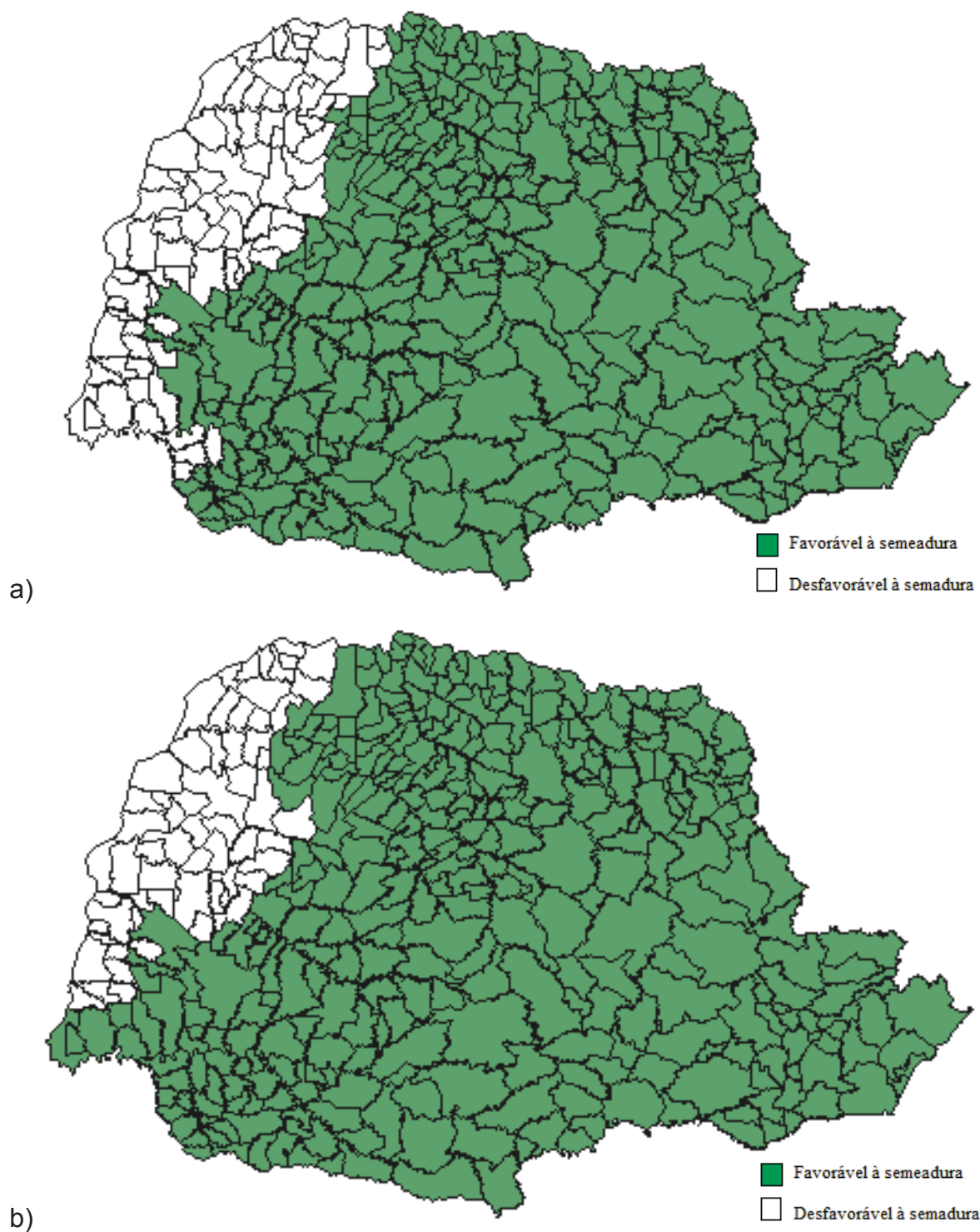
Pípolo et al. (2015) definiram os períodos de semeadura de diversos cultivares de soja no Estado do Paraná, lançados pela EMBRAPA, sendo que todas as datas estão entre setembro e dezembro.

Portanto, segundo diversos órgãos públicos (ADAPAR, EMBRAPA, IAPAR, MAPA) os períodos de semeadura das culturas milho 1ª safra e soja variam entre “agosto e novembro”, e “setembro e dezembro”, respectivamente. No presente trabalho, os períodos foram de outubro a dezembro para o milho, e de dezembro a janeiro para a soja.

Diversos fatores contribuem para as diferenças percebidas entre as datas de semeadura do milho e soja. Comparando as metodologias de elaboração dos zoneamentos de risco climático do IAPAR e MAPA com a metodologia avaliada no presente trabalho, verificou-se que a principal diferença está no uso da probabilidade para estimar os valores de ocorrência das variáveis climáticas. Conforme apresentado em Capítulos anteriores (Capítulos 2 e 3), componentes hídricas agrupadas em períodos decendiais, como a precipitação, não seguem a distribuição normal, o que indica que não deveriam ser analisados com ferramentas estatísticas básicas, como a média.

Outra questão que deve ser considerada é a dependência espacial das variáveis climáticas. Portanto, a análise do risco climático não deve considerar cada município individualmente, mas a região de estudo como uma área contínua. Esse fato permite estimar informações com maior precisão em grandes regiões.

FIGURA 4.5 – ZONEAMENTO AGRÍCOLA DO ESTADO DO PARANÁ, CONTENDO OS MUNICÍPIOS FAVORÁVEIS À SEMEADURA DE 01 A 10 DE DEZEMBRO, EM SOLO TIPO II (TEXTURA MÉDIA), SENDO: a) MILHO CICLO 130 DIAS; E, b) SOJA CICLO 120 DIAS



FONTE: Agritempo (2017).

4.4 CONCLUSÕES

Em média, considerando o Estado do Paraná como um todo, os riscos hídricos e térmicos nos decêndios 30 (18 out) e 35 (07/dez) são os mais favoráveis à semeadura do milho e soja, respectivamente, persistindo até meados de Janeiro.

A principal diferença das metodologias de zoneamentos de risco climático de entidades públicas governamentais está no uso da probabilidade para estimar os valores de ocorrência das variáveis climáticas.

4.5 REFERÊNCIAS

- ADAPAR - Agência de Defesa Sanitária do Paraná. Portaria nº 202, de 19 de julho de 2017. Estabelece o período do vazio sanitário, as datas limites para semeadura e colheita da soja no Estado do Paraná, e dá outras providências.
- Agritempo – Sistema de monitoramento agrometeorológico. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp>>. Acesso em 10 out. 2017.
- Alvares, CA, Stape JL, Sentelhas PJ, Gonçalves JLM, Sparovek G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 2013; 2:711-728.
- Araújo EM, Araújo EM, Oliveira JB, Silva MG, Viana PC, Alves AS. Análise da aderência de distribuições de probabilidade aos dados de temperatura máxima e mínima do ar em Iguatu-CE. *Revista Caatinga*, 2010a;23(3):104-109.
- Araújo EM, Silva IN, Oliveira JB, Cavalcante Junior EG, Almeida BM. Aplicação de seis distribuições de probabilidade a séries de temperatura máxima em Iguatu-CE. *Revista Ciência Agronômica*. 2010b;41(1):36-45.
- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: Institute of the American Society of Civil Engineers; 2005.
- Assad ED, Sano EE. Sistema geográfico de informações: aplicações na agricultura. Brasília: Embrapa; 1998. 480 p.
- Assis FN, Arruda HV, Pereira AR. Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática. Pelotas: Ed. da UFPel, 1996. 161p.
- Bhering SB, Santos HG, Manzatto CV, Bognola I, Carvalho AP, Potter O, Aglio MLD, Silva JS, Chaffin CE, Carvalho Junior W. Mapa de Solos do Estado do Paraná. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2007.
- Blain GC. Séries anuais de temperatura máxima média do ar no Estado de São Paulo: variações e tendências climáticas. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2010;25(1):114-124.
- Blain GC, Picoli MCA, Lulu J. Análises estatísticas das tendências de elevações e séries anuais de temperatura mínima do ar no Estado de São Paulo. *Bragantia*. 2009;68(3):807-815.
- Bussab WO, Morettin PA. Estatística básica. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540p.
- Caramori, P. H. Zoneamento agrícola do estado do Paraná. Londrina: IAPAR; 2003.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Séries históricas de área plantada, produtividade e produção, relativas às safras 1976/77 a 2016/17 de grãos.

Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&Pagina_objcmsconteudos=1#A_o_bjcmsconteudos>. Acesso em 10 jan. 2018.

Cunha GR, Barni NA, Haas JC, Maluf JRC, Matzenauer R, Pasinato A, Pimentel MB, Pires JLF. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001;9:446-459.

Farias JRB, Assad ED, Almeida IR, Evangelista BA, Lazzarotto C, Neumaier N, Nepomuceno AL. Caracterização de risco climático nas regiões produtoras de soja no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001;9(3):415-421.

Farias JRB, Neumaier N, Nepomuceno AL. Soja. In: Monteiro JEBA.

Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009.

Franchini JC, Balbinot Junior AA, Nitsche PR, Debiasi H, Lopes ION. Variabilidade espacial e temporal da produção de soja no Paraná e definições de ambientes de produção. Londrina: EMBRAPA Soja, 2016.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Valor adicionado bruto, participação e taxa de crescimento, segundo as atividades econômicas no Paraná. Disponível em:

<http://www.ipardes.gov.br/pdf/indices/tab_pib_03.pdf>. Acesso em 10 jan. 2018.

ITCG – Instituto de Terras Cartografias e Geociências. Mapa de clima do Estado do Paraná. Curitiba: ITCG, 2006.

Khazaei B, Hosseini SM. Improving the performance of water balance equation using fuzzy logic approach. *Journal of Hydrology*. 2015;524:538–548.

Maack R. Geografia física do Estado do Paraná. 4th ed. Curitiba: IBPT; 2012.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Zoneamento agrícola de risco climático. 2016. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em 15 jan 2016.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Parâmetros de risco climático. 2017. Disponível em:

<<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscosseguro/riscoagropecuario/documentos/Parametrosderiscoclimatico.pdf/view>>. Acesso em 31 jan. 2017.

Perkins SE, Pitman AJ, Holbrook NJ, McAneney J. Evaluation of the AR4 climate models simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *Journal of Climate*. 2007;20:4356-4376.

Pípolo AE, Carneiro GES, Melo CLP, Lima D, Foloni JSS, Miranda LC, Petek MR, Borges RS, Gomide FB, Dalbosco M, Dengler RU. Cultivares de soja: macrorregiões 1, 2 e 3 Centro-Sul do Brasil. Londrina: EMBRAPA Soja, 2015.

Praveena, SM, Abdullah MH, Bidin K, Aris AZ. Modeling of water balance components in a small island via a numerical model application. *Journal of Coastal Research*. 2012;28(1):202-209.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop version 5.0 reference manual. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.

Rio A, Sentelhas PC, Farias JRB, Sibaldelli RNR, Ferreira RC. Alternative sowing dates as a mitigation measure to reduce climate change impacts on soybean yields in southern Brazil. *International Journal of Climatology*. 2016;36:3664-3672.

Rossetti LA. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001;9(3):386-399.

- Sentelhas PC, Santos DL, Machado RE. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. *Água*. 2008;3(3):28-42.
- Silva AO, Correia JS, Bassoi LH, Teixeira AHC. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, PE. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*. 2015;9(1):30-38.
- Soccol, O. J.; Cardoso, C. O.; Miquelluti, D. J. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2010;14:569-574.
- Souza JLM, Jerszurki D, Damazio EC. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2013;48(7):693-702.
- Xavier AC, King CW, Scanlon BR. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*. 2016;36:2644-2659.
- Yan Z, Gottschalk L, Leblois E, Xia J. Joint mapping of water balance components in a large Chinese basin. *Journal of Hydrology*. 2012;450:59-69.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversas componentes hídricas e variáveis climáticas foram estudadas no presente trabalho: precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração real (ET_r), armazenamento de água no solo na zona da raiz (S), deficiência hídrica (Def), temperatura mínima ($T_{mín}$) e máxima ($T_{máx}$).

Foram obtidos, para as variáveis climáticas, os parâmetros das funções densidade de probabilidade de melhor ajuste para os 37 decêndios do ano, em todo o Estado do Paraná. Com isso, foi possível obter os valores prováveis, com qualquer nível de probabilidade de ocorrência. Os resultados estão disponíveis a quaisquer usuários e têm uma série de aplicações voltadas à diversas ciências ambientais e agrárias, mas sobretudo ao planejamento agrícola.

A metodologia do zoneamento de risco agroclimático apresentada pode servir de suporte para o aprimoramento da atual metodologia utilizada pelos órgãos públicos para disponibilizar o zoneamento agrícola no Brasil.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho permitiu estimar as probabilidades de êxito com base nas necessidades hídricas e térmicas das culturas milho e soja no Estado do Paraná, incorporando no zoneamento de risco agroclimático a metodologia do balanço hídrico agrícola provável.

Posteriormente, poderá se adicionar novas exigências fisiológicas, as quais sejam importantes no desenvolvimento e produtividade das culturas agrícolas. Além disso, com a consolidação da metodologia poderá se estabelecer zoneamentos de riscos agroclimáticos para outras culturas agrícolas de relevância econômica, em diferentes regiões brasileiras, ou para todo o Brasil.

Por fim, no futuro poderá ser desenvolvido um *software* de suporte e apoio à decisão, que inclua as informações do presente trabalho, em que o usuário entrará com informações básicas de seu interesse. Assim, o *software* retornará a probabilidade de êxito e os riscos de se plantar na região escolhida.

REFERÊNCIAS GERAIS

- ADAPAR – Agência de Defesa Sanitária do Paraná. Portaria nº 202, de 19 de julho de 2017. Estabelece o período do vazio sanitário, as datas limites para semeadura e colheita da soja no Estado do Paraná, e dá outras providências.
- Agritempo – Sistema de monitoramento agrometeorológico. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp>>. Acesso em 10 out. 2017.
- Alencar LP, Sedyama GC, Mantovani EC. Estimation of reference evapotranspiration (ET_o) under FAO standards with missing climatic data in Minas Gerais, Brazil. *Engenharia Agrícola*. 2015;35(1): 39-50.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D. Crop evapotranspiration. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56; 1998.
- Alvares, CA, Stape JL, Sentelhas PJ, Gonçalves JLM., Sparovek G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 2013; 2:711-728.
- Araújo EM, Araújo EM, Oliveira JB, Silva MG, Viana PC, Alves AS. Análise da aderência de distribuições de probabilidade aos dados de temperatura máxima e mínima do ar em Iguatu-CE. *Revista Caatinga*, 2010a;23(3):104-109.
- Araújo EM, Silva IN, Oliveira JB, Cavalcante Junior EG, Almeida BM. Aplicação de seis distribuições de probabilidade a séries de temperatura máxima em Iguatu-CE. *Revista Ciência Agronômica*. 2010b;41(1):36-45.
- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: Institute of the American Society of Civil Engineers; 2005.
- Assad ED, Sano EE. Sistema geográfico de informações: aplicações na agricultura. Brasília: Embrapa; 1998. 480 p.
- Assis FN, Arruda HV, Pereira AR. Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática. Pelotas: Ed. da UFPel, 1996. 161 p.
- Baron C, Clopes A. Sistema de análise regional dos riscos agroclimáticos (SARRAMET/SARRAZON). Montpellier: CIRAD, 1996.
- Baron C, Perez P, Maraoux F. Sarrazon: Bilan hydrique appliqué au zonage. Montpellier: CIRAD, 1996. 26p.
- Berner EK, Berner RA. Global water cycle: geochemistry and environment. New Jersey: Prentice-Hall; 1987, 397 p.
- Bhering SB, Santos HG, Manzatto CV, Bognola I, Carvalho AP, Potter O, Aglio MLD, Silva JS, Chaffin CE, Carvalho Junior W. Mapa de solos do Estado do Paraná. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2007.
- Blain GC. Séries anuais de temperatura máxima média do ar no Estado de São Paulo: variações e tendências climáticas. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2010;25(1):114-124.
- Blain GC, Brunini O. Caracterização do regime de evapotranspiração real, em escala decenal, no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2007;22(1):75-82.
- Blain GC, Picoli MCA, Lulu J. Análises estatísticas das tendências de elevações séries anuais de temperatura mínima do ar no Estado de São Paulo. *Bragantia*. 2009;68(3):807-815.
- Brisson N, Bussière F, Ozier-Lafontaine H, Tournébizet R, Sinoquet H. Adaptation of the crop model STICS to intercropping: theoretical basis and parameterisation. *Agronomie*. 2004;24 (6-7):409-421.

- Budyko MI. Climate and life. New York: Academic Press, 1974.
- Bussab WO, Morettin PA. Estatística básica. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540p.
- Camargo AP. Balanço hídrico no estado de São Paulo. Campinas: IAC, 1971. 28p.
- Camargo AP, Sentelhas PC. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia. 1997;5(1):89-97.
- Caramori PH. Zoneamento agrícola do estado do Paraná. Londrina: IAPAR; 2003.
- Castro FS, Pezzopane JEM, Cecílio RA, Pezzopane JRM, Xavier AC. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2010;14(8):871-880.
- Cavalcante Junior EG, Oliveira AD, Almeida BM, Sobrinho JE. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semi-árido Nordeste. Semina. 2011;32:1699-1708.
- Chauhan S, Shrivastava RK. Performance evaluation of reference evapotranspiration estimation using climate based methods and artificial neural networks. Water Resource Management. 2009; 23(5):825-837.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Séries históricas de área plantada, produtividade e produção, relativas às safras 1976/77 a 2016/17 de grãos. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&Pagina_objcmsconteudos=1#A_objcmsconteudos>. Acesso em 10 jan. 2018.
- Cunha GR, Barni NA, Haas JC, Maluf JRC, Matzenauer R, Pasinato A, Pimentel MB, Pires JLF. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Agrometeorologia. 2001;9:446-459.
- Dale RF. Applied Climatology. Indiana: Purdue University, 1968, 125p.
- Dias LCP, Macedo MN, Costa MH, Coe MT, Neill C. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. Journal of Hydrology: Regional Studies. 2015;4(B):108-122.
- Doorenbos J, Kassam AH. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, Rome: FAO, 1979.
- Doorenbos J, Pruitt WO. Crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 1977. 144p.
- Famiglietti JS, Rodell M. Water in the balance. Science. 2013;340(6138):1300-1301.
- Farahmand A, Aghakouchak A. A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. Advances in Water Resources. 2015;76:140-145.
- Farias JRB, Assad ED, Almeida IR, Evangelista BA, Lazzarotto C, Neumaier N, Nepomuceno AL. Caracterização de risco climático nas regiões produtoras de soja no Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia. 2001;9(3):415-421.
- Farias JRB, Neumaier N, Nepomuceno AL. Soja. In: Monteiro JEBA. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009.
- Franchini JC, Balbinot Junior AA, Nitsche PR, Debiasi H, Lopes ION. Variabilidade espacial e temporal da produção de soja no Paraná e definições de ambientes de produção. Londrina: EMBRAPA Soja, 2016.
- Gardiman Junior BS, Magalhães IAL, Cecílio RA. Comparação entre diferentes métodos de estimativas de evapotranspiração de referência (ET_o) para Linhares-ES. Nucleus. 2012; 9(2):103-112.
- Getirana A. Extreme water deficit in Brazil detected from space. Journal of Hydrometeorology. 2016;17(2):591-599.

- Gurski BC, Souza JLM, Evangelista AWP, Jerszurki D, Armindo RA. Modelos para estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, feijoeiro e milho. Irriga. 2016a;Edição Especial Irrigação:155-167.
- Gurski BC, Souza JLM, Jerszurki D, Armindo RA, Evangelista AWP. Periodicity of crop coefficient and soil water depletion fraction in a climatological water balance. African Journal of Agricultural Research. 2016b;11(45):4619-4626.
- Gurski BC, Souza JLM, Jerszurki D, Evangelista AWP, Armindo RA. Specific adjustment functions for daily crop coefficient in Brazil. International Journal of Current Research. 2016c;8(8):35537-35542.
- Hargreaves GH, Samani ZA. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering Agriculture. 1985;1(2):96-99. DOI: 10.13031/2013.26773.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology. 2005;25:1965-1978.
- Hsiao TC, Lee H, Steduto B, Basilio RL, Raes D, Fereres E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III parameterization and testing for maize. Agronomy Journal. 2009;101:448-459.
- Hupet F, Vanclooster M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of reference evapotranspiration. Journal of Hydrology. 2001;243:192-204.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa/BDMEP. 2016. Disponível em: <<http://www.bdmpe.inmet.br/>>. Acesso em 22 jun. 2016.
- IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Valor adicionado bruto, participação e taxa de crescimento, segundo as atividades econômicas no Paraná. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/pdf/indices/tab_pib_03.pdf>. Acesso em 10 jan. 2018.
- Irmak S, Payero JO, Martin DL, Irmak A, Howell TA. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2006;132:564–578.
- ITCG – Instituto de Terras Cartografias e Geociências. Mapa de clima do Estado do Paraná. Curitiba: ITCG, 2006.
- Jensen ME. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York: ASCE, 1974. 215p.
- Jerszurki D, Souza JLM, Evangelista AWP. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba-PR. Revista Brasileira de Biometria. 2015a;33(2):118-129.
- Jerszurki D, Souza JLM, Evangelista AWP. Distribuição de probabilidade e movimento temporal da precipitação na região de Telêmaco Borba, Paraná. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. 2015b;10(1):110-116.
- Jerszurki D, Souza JLM, Silva LCR. Expanding the geography of evapotranspiration: an improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. PLoS ONE. 2017;12(6):01-19.
- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Wilkens PW, Singh U, Gijsman AJ, Ritchie JT. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy. 2003;18:235-265.
- Keating BA, Carberry PS, Hammer GL, Probert ME, Robertson MJ, Holzworth D, Huth NI, Hargreaves JNG, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes JP, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow KL, Asseng S, Chapman S,

- McCown RL, Freebairn DM, Smith CJ. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*. 2003;18(3-4):267-288.
- Khazaei B, Hosseini SM. Improving the performance of water balance equation using fuzzy logic approach. *Journal of Hydrology*. 2015;524:538–548.
- Köppen W. Das geographische system der klimate. *Handbuch der Klimatologie*. Gebruder Borntrager. 1936;1:01-44.
- Li D, Shao M. Temporal stability analysis for estimating spatial mean soil water storage and deep percolation in irrigated maize crops. *Agricultural Water Management*. 2014;144:140-149.
- Linacre ET. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*. 1977;18:409-424.
- Liu B, Shao M. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*. 2014;517:974-984.
- Maack R. Geografia física do Estado do Paraná. 4th ed. Curitiba: IBPT; 2012.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Zoneamento agrícola de risco climático. 2016. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em 10 jan. 2018.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Parâmetros de risco agroclimático. 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuário/documentos/Parametrosderisoclimatico.pdf>>. Acesso em 10 jan. 2018.
- Martínez FEM, Deantonio LY, Araujo GAF, Rojas EO, Gómez-Latorre DA, Alzate DF, Ortiz LA, Aguilera EG, Boshell-Villamarín JF. Agroclimatic zoning methodology for agricultural production systems in dry Caribbean region of Colombia. *Agronomía Colombiana*. 2016;34 (3):374-384.
- Mendonça JC, Sousa EF, Bernardo S, Dias GP, Grippa S. Comparação de estimativa entre métodos de evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2003;7:276-279.
- Nied AH, Heldwein AB, Estefanel V, Silva JC, Alberto CM. Épocas de semeadura do milho com menor risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS, Brasil. *Ciência Rural*. 2005;35(5):995-1002.
- Oliveira CT. Modelo AquaCrop: calibração, validação e uso para soja e milho na região dos Campos Gerais. Dissertação de Mestrado. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017.
- Pandey KP, Dabral PP, Pandey V. Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *International Soil and Water Conservation Research*. 2016;4:56-67.
- Paulo A, Martins D, Pereira LS. Influence of precipitation changes on the SPI and related drought severity: an analysis using long-term data series. *Water Resource Management*. 2016;30:5737-5757.
- Penman HL. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society*. 1948;193:120-145.
- Pereira AR, Vila Nova NA, Sedyama GC. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: ESALQ, 1997.
- Pereira LS, Allen LG, Smith M, Raes D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future. *Agricultural Water Management*. 2015;147:04-20.
- Perkins SE, Pitman AJ, Holbrook NJ, McAneney J. Evaluation of the AR4 climate models simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and

- precipitation over Australia using probability density functions. *Journal of Climate*. 2007;20:4356-4376.
- Pípolo AE, Carneiro GES, Melo CLP, Lima D, Foloni JSS, Miranda LC, Petek MR, Borges RS, Gomide FB, Dalbosco M, Dengler RU. Cultivares de soja: macrorregiões 1, 2 e 3 Centro-Sul do Brasil. Londrina: EMBRAPA Soja, 2015.
- Praveena SM, Abdullah MH, Bidin K, Aris AZ. Modeling of water balance components in a small island via a numerical model application. *Journal of Coastal Research*. 2012;28(1):202-209.
- Pruitt WO, Oettingen SV, Morgan DL. Central California evapotranspiration frequencies. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 1972;98:177-184.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 2009;101:438-447.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop version 5.0 reference manual. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.
- Ribeiro BT, Ferreira Junior DC, Silva CR. Ten-day probable rainfall for Uberlândia, Minas Gerais State, Brazil. *Bioscience Journal*. 2013;29(3):536-542.
- Rio A, Sentelhas PC, Farias JRB, Sibaldelli RNR, Ferreira RC. Alternative sowing dates as a mitigation measure to reduce climate change impacts on soybean yields in southern Brazil. *International Journal of Climatology*. 2016;36:3664-3672.
- Rossetti LA. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001;9(3):386-399.
- Sampaio SC, Longo AJ, Queiroz MMF, Gomes BM, Villas Boas MA, Suszek M. Estimativa e distribuição da precipitação mensal provável no Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Human and Social Sciences*. 2006;28:267-272.
- Sentelhas PC, Santos DL, Machado RE. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. *Ambiágua*. 2008;3(3):28-42.
- Silva JC, Heldwein AB, Trentin G, Streck NA, Martins FB. Funções de distribuição de probabilidade decendial e mensal para a deficiência hídrica no solo. *Ciência Rural*. 2008;38(7):1893-1899.
- Silva AO, Correia JS, Bassoi LH, Teixeira AHC. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, PE. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*. 2015;9(1):30-38.
- Silva RD, Silva MAA, Canteri MG, Rosisca JR, Vieira Junior NA. Reference evapotranspiration for Londrina, Paraná, Brazil: performance of different estimation methods. *Semina: Ciências Agrárias*. 2017;38(4/1):2363-2374.
- Siqueira GM, Vieira SR, Camargo MBP. Variabilidade espacial do armazenamento e perda média diária de água pelo solo no sistema de semeadura direta em Campinas, SP. *Bragantia*. 2008;67(1):213-223.
- Soccol, O. J.; Cardoso, C. O.; Miquelluti, D. J. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2010;14:569-574.
- Souza JLM. Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR; 2013.
- Souza JLM, Gomes S. Avaliação e desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2007;29(4):433-443.

- Souza JLM, Gomes S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2008;30(2):153-163.
- Souza JLM, Jerszurki D, Damazio EC. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2013;48(7):693-702.
- Souza JM, Pereira LR, Rafael AM, Silva LD, Reis EF, Bonomo R. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration in two locations of Espírito Santo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*. 2014;8(2):114-126.
- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Loonc AFV, Stahl K. Candidate distributions for climatological drought indices. *International Journal of Climatology*. 2015;35:4027-4040.
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 2009;101:426-437.
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- Stöckle AC, Donatelli M, Nelson R. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*. 2003;18:289-317.
- Thornthwaite CW, Mather JR. The water balance. Centerton: Laboratory of Climatology, 1955.
- Syperreck VLG, Klosowski ES, Greco M, Furlanetto C. Avaliação de desempenho de modelos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2008;30:603-609.
- Thornthwaite CW. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 1948;38(1):55-94.
- Todorovic M, Karic B, Pereira LS. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology*. 2013;481:166-176.
- Trajkovic S, Kolakovic S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management*. 2009;23:3057-3067.
- Vanuytrecht E, Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Heng LK, Vila MG, Moreno PM. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environ. Model. Softw.*, 2014;62:351-360.
- Vicente-Serrano SM, Schrier GV, Beguería S, Azorin-Molina C, Lopez-Moreno JL. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology*. 2015;526:42-54.
- Xavier AC, King CW, Scanlon BR. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal of Climatology*. 2016;36:2644-2659.
- Yan H, Wang SQ, Billesbach D, Oechel W, Zhang JH, Meyers T. Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model. *Remote Sensing of Environment*. 2012a;124: 581-595.
- Yan Z, Gottschalk L, Leblois E, Xia J. Joint mapping of water balance components in a large Chinese basin. *Journal of Hydrology*. 2012b;450:59-69.
- Yoder RE, Odhiambo LO, Wright WC. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applying Engineering Agriculture*. 2005;21:197-202.

Wang P, Song X, Han D, Zhang Y, Zhang B. Determination of evaporation, transpiration and deep percolation of summer corn and winter wheat after irrigation. *Agricultural Water Management*. 2012;105:32-37.

Willmott CJ, Rowe CM, Mintz Y. Climatology of terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climatology*. 1985;5:589-606.

APÊNDICE 1 – PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA

As considerações dispostas nesse Apêndice são básicas para o cálculo do balanço hídrico agrícola. Existem módulos adicionais em Raes et al. (2016) que descrevem outros cálculos, como estimativa da produtividade de culturas agrícolas, estresses em decorrência de temperatura, falta de aeração, fertilidade, salinidade, entre outros, que podem auxiliar na especificação do meio em que o balanço hídrico é realizado.

1 Armazenamento de água no solo na zona radicular

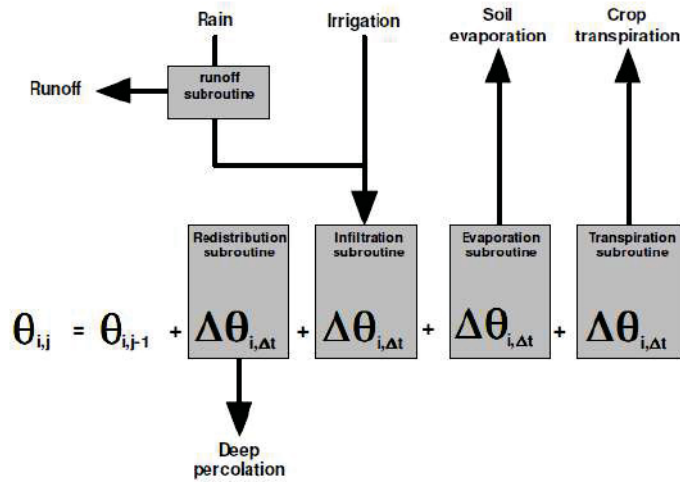
$$S = 1000 \cdot \theta \cdot z$$

Sendo: S – armazenamento de água do solo na zona radicular (mm); θ – umidade volumétrica média na zona radicular ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); z – profundidade efetiva do sistema radicular (m).

1.1 Umidade no solo

A equação de fluxo diferencial foi substituída por um conjunto de equações de diferenças finitas (sub-rotinas), escritas em termos da variável dependente θ (Figura A.1.1). A simulação começa com a drenagem do perfil do solo. Posteriormente, a água se infiltra (após a subtração do escoamento superficial) e, finalmente, calcula-se a quantidade de água perdida pela evaporação do solo e transpiração da cultura. Em cada uma das sub-rotinas descritas, a umidade do solo é atualizada no final do tempo (j) e em cada camada (i), de acordo com a variação calculada da umidade ($\Delta\theta$).

FIGURA A.1.1 – CÁLCULO DA UMIDADE DO SOLO NO MODELO AQUACROP



FONTE: Raes et al. (2016).

1.2 Profundidade efetiva do sistema radicular

O desenvolvimento da z é função do tempo e tipo de cultura. A profundidade de enraizamento começa a aumentar a partir da profundidade inicial até a profundidade efetiva do sistema radicular máxima ser atingida:

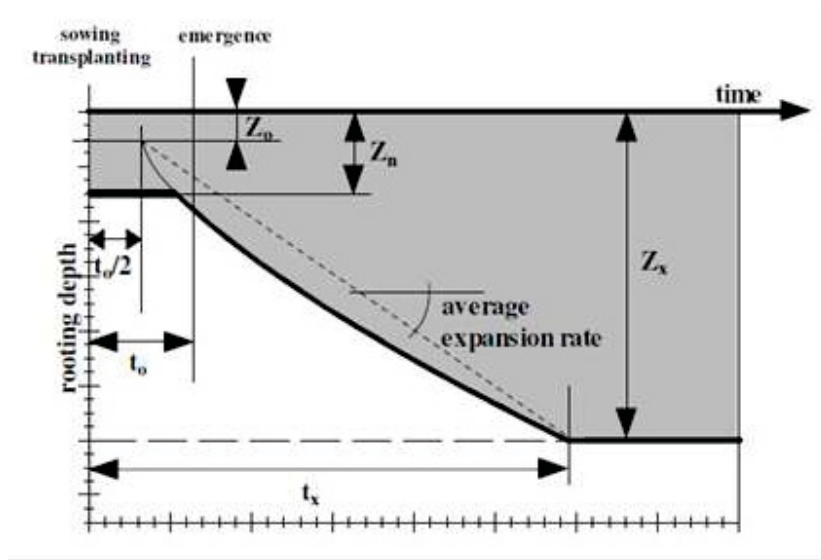
$$z_i = z_o + (z_m - z_o) \cdot \sqrt[n]{\frac{\left(t_i - \frac{t_o}{2}\right)}{\left(t_f - \frac{t_o}{2}\right)}}$$

em que $z_o \leq z \leq z_m$

Sendo: z_i – profundidade efetiva do sistema radicular no i -ésimo dia (m); z_o – profundidade inicial do sistema radicular (m); z_m – profundidade efetiva máxima do sistema radicular (m); t_i – tempo após plantio (dias ou graus dia acumulado); t_o – tempo para chegar a 90% da emergência da cultura (dias ou graus dia acumulado); n – fator de forma.

O fator de forma n , que é específico da cultura, determina a velocidade decrescente da expansão da zona radicular no tempo. Para valores maiores que 1, a expansão da z é mais importante após o plantio do que posteriormente. Quanto maior o valor de n , maior a discrepância entre as taxas de expansão no início e no final do período. A z é constante (linear) quando $n = 1$ (Figura A.1.2). A taxa média de expansão da z nunca pode exceder o valor máximo (fixado a $0,05 \text{ m dia}^{-1}$).

FIGURA A.1.2 – DESENVOLVIMENTO DA PROFUNDIDADE EFETIVA DO SISTEMA RADICULAR (Z – ÁREA CINZA) DO PLANTIO À PROFUNDIDADE EFETIVA MÁXIMA (Z_m)



FONTE: Raes et al. (2016).

2 Drenagem profunda

O AquaCrop utiliza uma função exponencial para simular a redistribuição de água em cada camada de solo, drenagem do perfil de solo e infiltração devida a precipitação e/ou irrigação (Raes, 1982; Raes et al., 1988; Raes et al., 2006):

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau \cdot (\theta_s - \theta_{cc}) \cdot \frac{e^{\theta_i - \theta_{cc}} - 1}{e^{\theta_s - \theta_{cc}} - 1}$$

$$\text{Se } \theta_i = \theta_{cc} \quad \text{então: } \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = 0;$$

$$\text{Se } \theta_i = \theta_s \quad \text{então: } \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau \cdot (\theta_s - \theta_{cc})$$

Sendo: $\Delta\theta/\Delta t$ – habilidade de drenagem na i -ésima camada, durante a variação em t ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ dia}^{-1}$); τ – característica de drenagem do solo (adimensional); $\Delta\theta_i$ – variação da umidade do solo na i -ésima camada ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s – umidade do solo na saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{cc} – umidade do solo na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Δt – variação no tempo (dia).

A característica de drenagem do solo (τ) expressa a diminuição da umidade da camada de solo, originalmente na saturação, no final do primeiro dia de drenagem livre. É expressa como uma fração da quantidade drenável total de água, que é a umidade entre a saturação e a capacidade de campo. Quanto maior for o t ,

mais rápida a camada de solo atingirá a capacidade de campo (Barrios Gonzales, 1999):

$$0 \leq (\tau = 0,0866 \cdot K_{sat}^{0,35}) \leq 1$$

Sendo: K_{sat} – condutividade hidráulica do solo saturado (mm dia⁻¹)

Em um solo uniforme igualmente úmido, supõe-se que a diminuição da umidade do solo por dia ($\Delta\theta/\Delta t$) é constante ao longo do perfil de drenagem. A quantidade de água (mm) que percola além do perfil do solo no final de cada dia é dada por:

$$DP = 1000 \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$

Sendo: DP – conteúdo de água no solo drenado do perfil de solo (m³ m⁻³); $\Delta\theta/\Delta t$ – habilidade de drenagem (m³ m⁻³ dia⁻¹); Δz – variação na profundidade do solo (m); Δt – variação no tempo (dia).

3 Escoamento superficial

A estimativa da quantidade de precipitação perdida por escoamento superficial baseia-se na equação de uma curva (USDA, 1964, Rallison, 1980, Steenhuis et al., 1995):

$$ES = \frac{(P - 0,2 \cdot S_p)^2}{P + S_p - 0,2 \cdot S_p}$$

$$S_p = 254 \cdot \left(\frac{100}{cc} - 1 \right)$$

Sendo: ES – escoamento superficial (mm); P – precipitação (mm); S_p – potencial máximo de armazenamento de água no solo (mm); cc – coeficiente de curvatura (adimensional).

Um solo com coeficiente de curvatura (cc) elevado terá pequeno potencial de armazenamento (S_p) e poderá perder grande quantidade de precipitação por escoamento. O cc do solo é função da textura, declive, uso da terra e umidade relativa superior do solo (Tabela A.1.1).

TABELA A.1.1 – VALORES INDICATIVOS DO COEFICIENTE DE CURVATURA (cc) PARA DIFERENTES UMIDADES E TAXAS DE INFILTRAÇÃO

Umidade do Solo	Taxa de Infiltração (mm dia ⁻¹)			
	< 10	10 a 50	50 a 250	> 250
$\theta = \theta_{PMP}$	70	63	56	45
$\theta = (\theta_{CC} + \theta_{PMP}) / 2$	85	80	75	65
$\theta = \theta_{CC}$	93	91	88	84

FONTE: Smedema & Rycroft (1983).

4 Infiltração da água no solo

Após a subtração do escoamento superficial, a água restante da precipitação e/ou irrigação se infiltra no perfil do solo. A quantidade de água que se infiltra no perfil do solo é armazenada em compartimentos sucessivos de cima para baixo, não excedendo o limite de conteúdo de água no solo θ°_i (m³ m⁻³).

$$Inf = P + I - ES, \quad \text{tal que:} \quad Inf \leq (1000 \cdot \theta^{\circ}_i) \leq (1000 \cdot \theta_s)$$

Sendo: Inf – infiltração de água no perfil do solo (mm); P – precipitação (mm); I – irrigação (mm); θ°_i – limite de conteúdo de água no solo na i -ésima camada (m³ m⁻³).

O limite θ°_i na profundidade de solo particular depende da taxa de infiltração da camada de solo correspondente e da quantidade de água infiltrada que ainda não está armazenada no perfil do solo. A taxa de drenagem em θ°_i deve corresponder à quantidade de água que ainda tem de passar através do compartimento durante o dia. Se o fluxo exceder a taxa de infiltração máxima da camada de solo correspondente ($\theta^{\circ}_i = \theta_s$), a água extra será armazenada nos compartimentos acima, até que a parte restante, que tem de passar através do compartimento por unidade de tempo seja igual à taxa de infiltração máxima.

O procedimento de cálculo não é completamente independente da espessura das camadas do solo. No entanto, a estimativa simula o processo de infiltração, levando em consideração a umidade inicial do perfil do solo, a quantidade de água que se infiltra durante o tempo, a taxa de infiltração e as características de drenagem das diferentes camadas do solo do perfil do solo.

5 Ascensão capilar

A ascensão capilar é estimada considerando o tipo de solo e suas características hidráulicas. A relação entre a ascensão capilar e a profundidade do lençol freático é dada pela equação exponencial:

$$AC = \exp\left(\frac{\ln(z_L) - b}{a}\right)$$

Sendo: AC – ascensão capilar (mm dia^{-1}); z_L – profundidade do lençol freático abaixo da superfície do solo (m); a e b – parâmetros específicos do tipo de solo e suas características hidráulicas.

Como a magnitude da ascensão capilar é fortemente afetada pela forma da curva de retenção de água no solo e pela relação entre condutividade hidráulica e potencial da água, os parâmetros a e b da equação variam com a classe textural do solo. Para maiores informações consultar Janssens (2006).

6 Evaporação do solo

A evaporação do solo (E) é calculada considerando um coeficiente de evaporação da água do solo (Ke) e o efeito do estresse hídrico (Ritchie, 1972):

$$E = (Kr \cdot Ke) \cdot ETo$$

Sendo: E – evaporação do solo (mm); Kr – coeficiente de redução da evaporação (adimensional); Ke – coeficiente de evaporação do solo (adimensional); ETo – evapotranspiração de referência.

Quando $Kr < 1$, reduz a evaporação do solo, ou seja, quando há água insuficiente no solo para responder à demanda por evaporação da atmosfera. O Ke é proporcional à fração da superfície do solo não coberta pelo dossel ($1 - CD$) (Figura A1.3).

O fator proporcional é o coeficiente máximo de evaporação do solo (Kex), que integra os efeitos das características que distinguem a evaporação do solo da evapotranspiração da superfície de referência do dossel.

$$0 \leq \left(Kr = \frac{\exp^{f_K \cdot W_{rel}} - 1}{\exp^{f_K} - 1} \right) \leq 1$$

Sendo: f_K – fator de declínio (adimensional); W_{rel} – conteúdo de água relativo da camada de solo em que a água se move para a camada de superfície do solo evaporando (camada superior do solo com espessura $z_i = 0,15$ m, quando não atribuído outro valor).

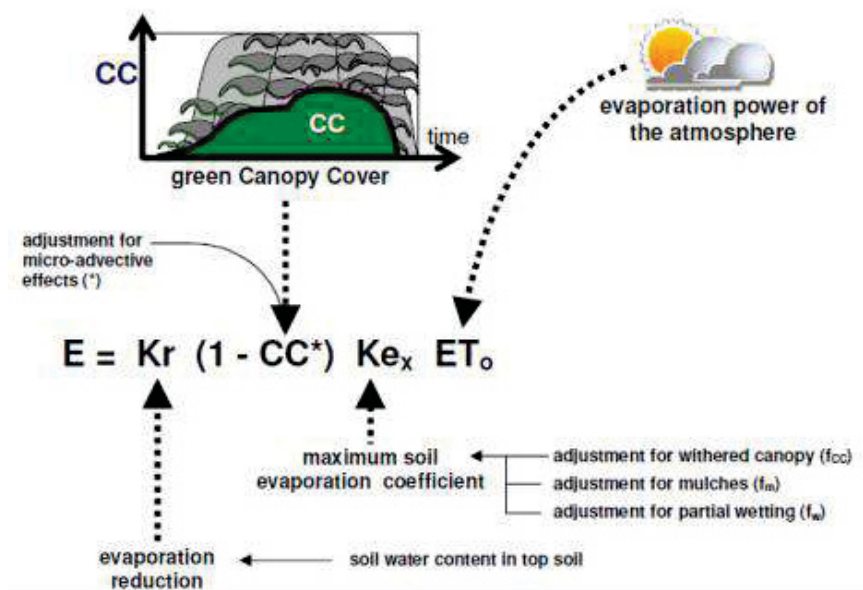
$$Ke = (1 - CD) \cdot Kex$$

$$(1 - CD) = (1 - 1,72 \cdot CD + CD^2 - 0,30 \cdot CD^3) \geq 0$$

Sendo: CD – cobertura do dossel (%); K_{ex} – coeficiente de evaporação máxima do solo (adimensional).

Quando a cobertura do dossel (CD) se expande na fase de desenvolvimento da planta, o K_e diminui gradualmente.

FIGURA A.1.3 – COMPONENTES DA EVAPORAÇÃO DO SOLO NO AQUACROP



FONTE: Raes et al. (2016).

7 Transpiração da cultura

A transpiração da cultura (T) é calculada considerando o coeficiente de transpiração da cultura e o efeito do estresse hídrico:

$$T = (K_s \cdot K_{cT}) \cdot ET_0$$

Sendo: T – transpiração da cultura (mm); K_s – coeficiente de estresse hídrico do solo (adimensional); K_{cT} – coeficiente de transpiração (adimensional).

Quando $K_s < 1$ há água insuficiente na zona radicular para responder à demanda evaporativa da atmosfera e a transpiração da cultura reduz. Para maiores informações sobre K_s verificar o tópico sobre estresse hídrico em Raes et al. (2016). O K_{cT} é proporcional à cobertura verde do dossel (CD).

$$K_{cT} = CD \cdot K_{cTx}$$

Sendo: K_{cTx} – coeficiente para máxima transpiração da cultura (solo bem irrigado e copa completa, $CD = 1$) (adimensional).

O K_{cTx} integra os efeitos das características que distinguem a transpiração da cultura da evapotranspiração da superfície de referência do dossel. Devido às diferenças no albedo, altura da cultura, propriedades aerodinâmicas, propriedades das folhas e estômatos, o K_{cTx} difere de 1, sendo: frequentemente 5 a 10% maior do que a ETo ; e, até 15 a 20% maior para culturas altas, como milho, sorgo ou cana-de-açúcar. O K_{cTx} é aproximadamente equivalente ao coeficiente basal de colheita na meia-estação para diferentes culturas (Allen et al., 1998), mas apenas para casos de CD completa.

REFERÊNCIAS

- Allen RG, Pereira LS, Raes D. Crop evapotranspiration. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper n. 56, 1998.
- Barrios Gonzales JM. Comparative study of three approaches in the computation of soil water balance. Master Dissertation Leuven: K.U. Leuven University, 1999, 93 p.
- Janssens P. Invloed van een ondiepe grondwatertafel op de planning van irrigaties voor intensieve groenteteelt. Master dissertation, Fac. Bio-ingenieurswetenschappen, Leuven: K.U. Leuven University, 2006, 89 p.
- Raes D. A summary simulation model of the water budget of a cropped soil. Dissertation, Leuven: K.U. Leuven University, 1982, 110 p.
- Raes D, Lemmens H., Van Aelst P, Vanden Bulcke M, Smith M. IRSIS: Irrigation scheduling information system. Leuven: K.U. Leuven University, Reference Manual 3, 1988, 199 p.
- Raes D, Geerts S, Kipkorir E., Wellens J, Sahli A. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agricultural Water Management*. 2006;81(3):335-357.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop version 5.0 reference manual. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.
- Rallison RE. Origin and evolution of the SCS runoff equation. Symposium on watershed management, New York: ASCE, p. 912-924, 1980.
- Ritchie JT. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*. 1972;8(5):1204-1213.
- Smedema LK, Rycroft DW. Land drainage: planning and design of agricultural drainage systems. London: Batsford Ltd., 1973.
- Steenhuis TS, Winchell M, Rossing J, Zollweg JA, Walter MF. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1995;121(3):234-238.
- USDA. Estimation of direct runoff from storm rainfall. Section 4 Hydrology, Chapter 4: 1-24, Washington: National Engineering Handbook, 1964.

APÊNDICE 2 – CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETo) COM O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) com o método de Penman-Monteith proposto por Allen et al. (1998) e atualizado pela ASCE-EWRI (2005):

$$ETo = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{Cn}{(T_{med} + 273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + Cd \cdot u_2)}$$

Sendo: ETo – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn – radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G – balanço do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); γ_{psy} – constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T_{med} – temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s^{-1}); es – pressão de saturação de vapor (kPa); ea – pressão atual do vapor (kPa); Cn – constante relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados, sendo considerado igual a 900 para a grama batatais (adimensional); Cd – constante relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados, sendo considerada igual a 0,34 para a grama batatais (adimensional).

A constante psicrométrica (γ_{psy}) foi obtida por meio da seguinte equação:

$$\gamma_{psy} = a_{psy} \cdot P$$

Sendo: γ_{psy} – constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); a_{psy} – coeficiente dependente do tipo de ventilação do bulbo úmido ($a_{psy} = 0,0008 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para psicrômetros de ventilação natural); P – pressão atmosférica (kPa).

A determinação da pressão atmosférica (P) partiu da simplificação da lei do gás ideal, assumindo a temperatura de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ para atmosfera padrão:

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot Z}{293} \right)^{5,26}$$

Sendo: P – pressão atmosférica (kPa); Z – altitude (m).

O cálculo da pressão de vapor (es) foi realizado utilizando-se a seguinte equação:

$$es = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2}$$

Sendo: es – pressão de saturação do vapor (kPa); $e^o(T_{\max})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima diária do ar (kPa); $e^o(T_{\min})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima diária do ar (kPa).

A pressão de saturação do vapor na temperatura “ T ” do ar [$e^o(T)$] foi obtida com a equação:

$$e^o(T) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right)}$$

Sendo: $e^o(T)$ – pressão de saturação do vapor na temperatura “ T ” do ar (kPa); T – temperatura do ar (°C); e – base do logaritmo neperiano (2,7183) elevada a potência (adimensional).

A declinação da curva de pressão de saturação do vapor (Δ) foi obtida por meio da seguinte relação:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e^o(T_{med})}{(T_{med} + 237,3)^2}$$

Sendo: Δ – declinação da curva de pressão de saturação do vapor (kPa °C⁻¹); $e^o(T_{med})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura média diária do ar (kPa); T_{med} – temperatura média diária do ar (°C).

A pressão atual do vapor (ea) foi determinada a partir de dados diários de umidade relativa média do ar:

$$ea = \frac{UR_{med}}{100} \cdot \left[\frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} \right]$$

Sendo: ea – pressão atual do vapor (kPa); UR_{med} – umidade relativa média diária do ar (adimensional); $e^o(T_{\max})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima diária do ar (kPa); $e^o(T_{\min})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima diária do ar (kPa).

A radiação solar no topo da atmosfera (Ra) para períodos diários foi estimada com a equação:

$$Ra = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)]$$

Sendo: Ra – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² min⁻¹); G_{sc} – constante solar (MJ m⁻² min⁻¹); d_r – distância relativa Terra-Sol (adimensional); ω_s – ângulo

horário correspondente ao pôr do Sol (radianos); φ – latitude (radianos); δ – declinação solar (radianos).

A distância relativa Terra-Sol (dr) e a declinação solar (δ) foram obtidas por:

$$dr = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right)$$

Sendo: dr – distância relativa Terra-Sol (adimensional); δ – declinação solar (radianos);

J – dia juliano.

O ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (ω_s) foi obtido por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)]$$

Sendo: ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos); φ – latitude (radianos); δ – declinação solar (radianos).

A radiação solar incidente (R_s) foi medida nas estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A radiação solar em céu sem nuvens R_{so} ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), foi calculada com a expressão:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot Z) \cdot R_a$$

Sendo: R_{so} – radiação solar em céu sem nuvens ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Z – altitude do local (m); R_a – radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}) foi calculado com a expressão:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s$$

Sendo: R_{ns} – saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); α – albedo ou coeficiente de reflexão da cultura hipotética (adimensional, $\alpha = 0,23$); R_s – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Assumindo que outros materiais como o CO_2 e a poeira, os quais absorvem e emitem ondas longas estão em concentração constante, a equação utilizada para aferir o saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}) foi a seguinte:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{(T_{\max})^4 + (T_{\min})^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{ea}) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

Sendo: R_{nl} – saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); σ – constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_{max} – temperatura máxima absoluta registrada no período de 24 horas (K); T_{min} – temperatura mínima absoluta registrada no período de 24 horas (K); ea – pressão atual do vapor (kPa); R_s/R_{so} – radiação relativa de ondas curtas (limitada para $\leq 1,0$); R_s – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{so} – radiação solar em céu sem nuvens ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O saldo de radiação (R_n) foi obtido pela seguinte equação:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Sendo: R_n – saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{ns} – saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{nl} – saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

A FAO (Allen et al., 1998) considera o fluxo de calor no solo (G) igual a zero para períodos diários. No entanto, Pereira et al. (1997) afirmam que se a temperatura média dos três dias anteriores (T_{-3d}) estiver disponível, então é possível calcular G por meio da relação empírica:

$$G = 0,38 \cdot (T_d - T_{-3d})$$

Sendo: G – fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_d – temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); T_{-3d} – temperatura média diária do ar dos três dias anteriores ($^{\circ}\text{C}$).

Com a inserção das componentes no modelo de Penman-Monteith (Allen et al., 1998; ASCE-EWRI, 2005) em uma planilha eletrônica, foi possível a obtenção da ETo diária das séries de dados.

REFERÊNCIAS

- Allen RG, Pereira LS, Raes D. Crop evapotranspiration. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper n. 56, 1998.
- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: Institute of the American Society of Civil Engineers; 2005.
- Pereira AR, Vila Nova NA, Sedyama GC. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: ESALQ; 1997.

APÊNDICE 3 – PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA

A seguir encontram-se apresentadas as funções densidade de probabilidade (*fdp*) Uniforme, Exponencial, Normal, Triangular e Gama, e suas respectivas funções de distribuição, que foram utilizadas nos testes de aderência com os dados decendiais de diversas variáveis, bem como para determinar os valores prováveis de ocorrência das componentes hídricas com a *fdp* de melhor ajuste (Assis et al., 1996; Souza, 2013).

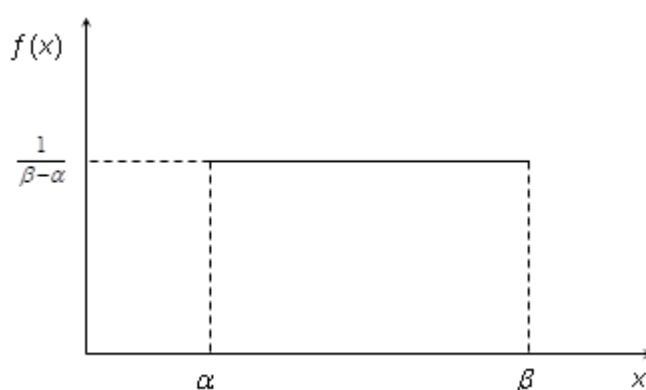
1 Função densidade de probabilidade Uniforme

A *fdp* Uniforme é um modelo no qual as realizações de uma variável aleatória estão contidas em um intervalo, ao longo do qual qualquer valor é igualmente provável (Figura A.3.1).

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta - \alpha}$$

Sendo: $f(x; \alpha, \beta)$ – função densidade de probabilidade Uniforme, tendo α e β como parâmetros; x – variável aleatória contínua; α – menor valor; β – maior valor. Validade para $\alpha \leq x \leq \beta$.

FIGURA A.3.1 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE UNIFORME



FONTE: Assis et al. (1996).

A probabilidade que a variável esteja em determinado intervalo é dada pela função distribuição:

$$F(x; \alpha, \beta) = P(X \leq x) = \int_{\alpha}^x \frac{1}{\beta - \alpha} dx = \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}$$

Sendo: $P(X \leq x)$ – probabilidade que a variável aleatória X tenha valores iguais ou menores a x ; x – variável aleatória contínua; α – menor valor da variável aleatória x ; β – maior valor da variável aleatória x .

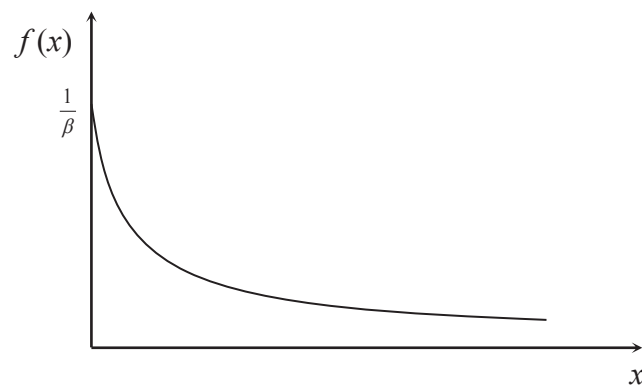
2 Função densidade de probabilidade Exponencial

A função densidade de probabilidade Exponencial (Figura A.3.2) é dada por:

$$f(x; \beta) = \frac{1}{\beta} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Sendo: $f(x; \beta)$ – função densidade de probabilidade Exponencial, tendo β como parâmetro; x – variável aleatória contínua. Validade $x > 0$.

FIGURA A.3.2 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE EXPONENCIAL



FONTE: Assis et al. (1996).

A função distribuição é obtida com a expressão:

$$F(x; \beta) = P(X \leq x) = \int_0^x \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x}{\beta}} dx = -e^{-\frac{x}{\beta}} \Big|_0^x = 1 - e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Sendo: $P(X \leq x)$ – probabilidade que a variável aleatória X tenha valores iguais ou menores a x ; β – parâmetro da distribuição.

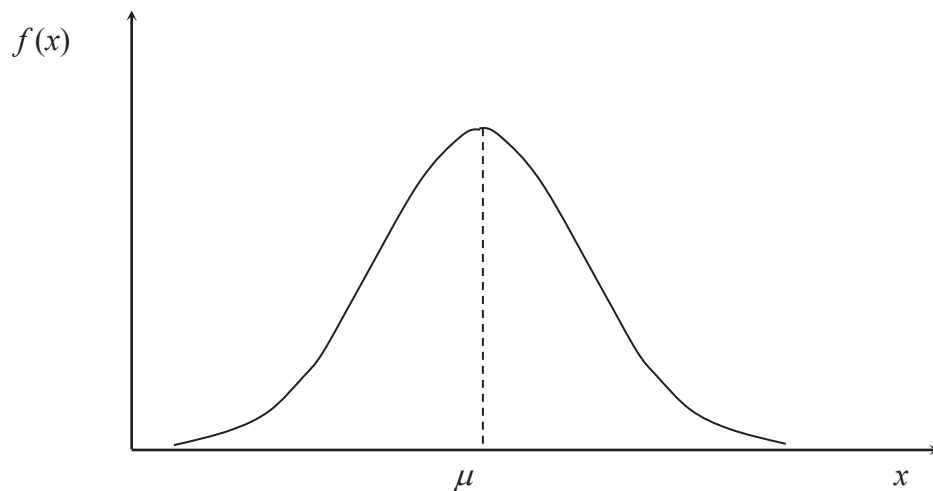
3 Função densidade de probabilidade Normal

A função densidade de probabilidade Normal (Figura A.3.3) é dada por:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Sendo: $f(x; \mu, \sigma)$ – função densidade de probabilidade Normal, tendo μ e σ^2 como parâmetros; x – variável aleatória contínua; μ – média da variável aleatória x ; σ^2 – variância da variável aleatória x . Validade para $-\infty \leq x \leq +\infty$.

FIGURA A.3.3 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE NORMAL



FONTE: Assis et al. (1996).

A função distribuição é obtida com a expressão:

$$F(x; \mu, \sigma^2) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Sendo: $P(X \leq x)$ – probabilidade que a variável aleatória X tenha valores iguais ou menores a x ; μ e σ^2 – parâmetro da distribuição.

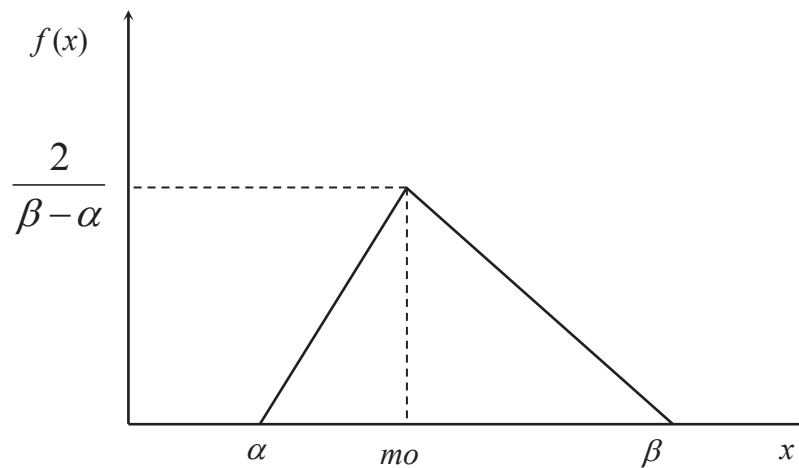
4 Função densidade de probabilidade Triangular

A função densidade de probabilidade Triangular (Figura A.3.4) é dada por:

$$f(x; \alpha, \beta, mo) = \begin{cases} \frac{2 \cdot (x - \alpha)}{(\beta - \alpha) \cdot (mo - \alpha)} & \text{para } \alpha \leq x \leq mo \\ \frac{2 \cdot (\beta - x)}{(\beta - \alpha) \cdot (\beta - mo)} & \text{para } mo < x \leq \beta \\ 0 & \text{para outros valores} \end{cases}$$

Sendo: $f(x; \alpha, \beta, mo)$ – função densidade de probabilidade Triangular, tendo α , β e mo como parâmetros; x – variável aleatória contínua; α – menor valor da variável aleatória x ; β – maior valor da variável aleatória x ; mo – moda da variável aleatória x .
Validade para $\alpha \leq x \leq \beta$.

FIGURA A.3.4 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE TRIANGULAR



FONTE: Assis et al. (1996).

A função de distribuição correspondente é:

$$F(x; \alpha, \beta, mo) = P(X \leq x) = \frac{(x - \alpha)^2}{(\beta - \alpha) \cdot (mo - \alpha)}, \text{ se } \alpha \leq x \leq mo$$

$$F(x; \alpha, \beta, mo) = P(X \leq x) = \frac{(mo - \alpha)}{(\beta - \alpha)} - \frac{(\beta - x)^2}{(\beta - \alpha) \cdot (\beta - mo)} + \frac{(\beta - mo)}{(\beta - \alpha)}, \text{ se } mo < x \leq \beta$$

Sendo: $P(X \leq x)$ – probabilidade que uma variável aleatória X tenha valores iguais ou menores a x ; α , β e mo – parâmetros da distribuição.

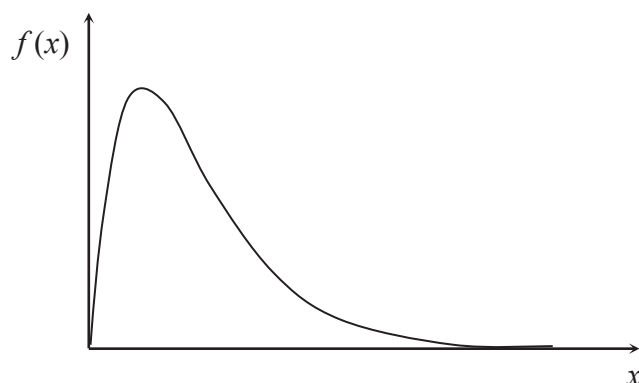
5 Função densidade de probabilidade Gama

A função densidade de probabilidade Gama (Figura A.3.5) é dada por:

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} \cdot x^{(\alpha-1)} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Sendo: $f(x; \alpha, \beta)$ – função densidade de probabilidade Gama, tendo α e β como parâmetros; $\Gamma(\alpha)$ – função gama; x – variável aleatória contínua; α – parâmetro de forma da variável aleatória x ; β – parâmetro de escala da variável aleatória x .
Validade para β e $\alpha > 0$; e $0 < x < \infty$.

FIGURA A.3.5 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE GAMA



FONTE: Assis et al. (1996).

A função de distribuição correspondente é:

$$F(x; \alpha, \beta) = P(X \leq x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \beta^\alpha} \cdot \int_0^x x^{(\alpha-1)} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}} dx$$

Sendo: $P(X \leq x)$ – probabilidade que uma variável aleatória X tenha valores iguais ou menores a x ; α e β – parâmetros da distribuição.

REFERÊNCIAS

Assis FN, Arruda HV, Pereira AR. Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática. Pelotas: Ed. da UFPel, 1996. 161 p.
Souza JLM. Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR; 2013.

APÊNDICE 4 – PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE

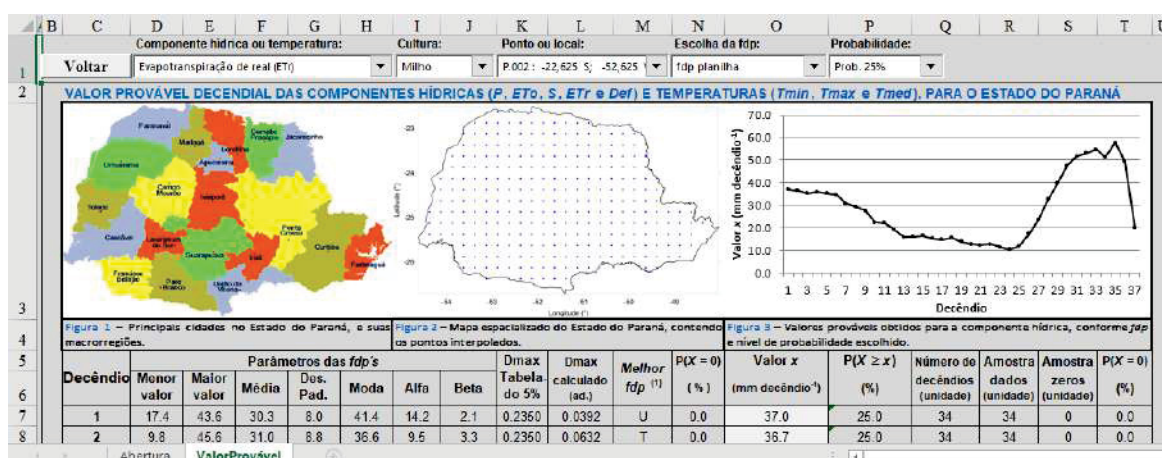
Os parâmetros das funções densidade de probabilidade de melhor ajuste obtidos no presente trabalho encontram-se em uma planilha desenvolvida para o cálculo dos valores prováveis de precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração real (ET_r), armazenamento de água no solo na zona da raiz (S), deficiência (Def) e excedente hídrico (Exc), radiação solar incidente (R_s), temperatura mínima ($T_{mín}$), máxima ($T_{máx}$) e média ($T_{méd}$) do ar, com qualquer nível probabilidade e em diferentes localidades (latitude x longitude) do Estado do Paraná.

O usuário poderá realizar o download da planilha e ter acesso no seguinte link:

<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes.htm#6_0orientacao_doutorado>.

Como parâmetros possíveis de opção, o usuário pode escolher entre as culturas milho e soja, componente hídrica ou térmica (P , ET_o , ET_c , ET_r , S , Def , R_s , $T_{mín}$, $T_{máx}$), localidade no Estado do Paraná (coordenadas latitude x longitude), função densidade de probabilidade (a de melhor ajuste ou uma especificamente) e probabilidade de ocorrência (1 a 99%) (Figura A.4.1).

FIGURA A.4.1 – PLANILHA CONTENDO OS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE MELHOR AJUSTE, OBTIDOS PARA AS COMPONENTES HÍDRICAS OU TÉRMICAS (P , ET_o , ET_c , ET_r , S , Def , R_s , $T_{mín}$, $T_{máx}$), E CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA, EM DETERMINADA LOCALIDADE NO ESTADO DO PARANÁ (COORDENADAS: LATITUDE X LONGITUDE)



FONTE: O autor (2018).

APÊNDICE 5 – PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA, DAS CULTURAS MILHO E SOJA, NO ESTADO DO PARANÁ

TABELA A.5.1 – PARÂMETROS DOS SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ UTILIZADOS NO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA

Solo/Textura	Prof. (m)	* θ_{PMP} ---	* θ_{CC} ($m^3 m^{-3}$)	* θ_S ---	* K_S (mm dia ⁻¹)	* AFE (mm)	* cc (adimensional)	* a	* b	Característica
Afloramento rochoso	0,5	0,01	0,03	0,05	0	0	77	-9,00	-9,00	Impermeável
Argissolo arenoso/médio	1,5	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,58	-0,51	Intermediário
Argissolo arenoso	0,5	0,27	0,39	0,5	35	10	77	-0,57	-1,61	Escoamento superficial
Argissolo argiloso	1,0	0,39	0,54	0,55	35	10	77	-0,61	0,59	B textural
Argissolo argiloso/médio	1,5	0,27	0,39	0,5	35	10	77	-0,57	-1,61	Intermediário
Argissolo médio	1,5	0,2	0,32	0,47	225	9	72	-0,58	-0,51	Intermediário
Cambissolo argiloso	1,0	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,61	0,59	B incipiente
Cambissolo médio	1,0	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,58	-0,51	B incipiente
Gleissolo arenoso/médio	1,5	0,10	0,22	0,41	1200	7	46	-0,32	0,22	Úmido
Gleissolo argiloso	1,5	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,61	0,59	Úmido
Latossolo argiloso	2,0	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,61	0,59	Sem restrições físicas
Latossolo médio	2,0	0,27	0,39	0,5	35	10	77	-0,57	-1,61	Sem restrições físicas
Neossolo Arenoso/médio	0,5	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,58	-0,51	Pouco profundo
Neossolo argiloso	0,5	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,61	0,59	Pouco profundo
Neossolo médio	0,5	0,20	0,32	0,47	225	9	72	-0,58	-0,51	Pouco profundo
Nitossolo Argiloso	2,0	0,39	0,54	0,55	35	14	77	-0,61	0,59	Muito profundo

FONTE: adaptado de Bhering et al. (2007) e Raes et al. (2016).

* θ_{PMP} – umidade do solo no ponto de murcha permanente; θ_{CC} – umidade do solo na capacidade de campo; θ_S – umidade do solo na saturação; K_S – condutividade hidráulica do solo saturado; AFE – água facilmente evaporável; cc – coeficiente de curvatura (Apêndice 1); a e b – parâmetros hidráulicos do solo (Apêndice 1).

TABELA A.5.2 – PARÂMETROS DAS CULTURAS AGRÍCOLAS UTILIZADOS NO AQUACROP PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO AGRÍCOLA PARA SOJA E MILHO

----- Parâmetro -----	Milho	Soja
Ciclo (dias)	365	365
Estádio de desenvolvimento I – semeadura a emergência (dias)	1	1
Estádio de desenvolvimento II – crescimento vegetativo a início do florescimento (dias)	363	363
Estádio de desenvolvimento III – florescimento/enchimento de grão (dias)	364	364
Estádio de desenvolvimento IV – maturação (dias)	365	365
Dossel (plantas ha ⁻¹)	65.000	300.000
Temperatura base inferior (°C)	15,5	13
Temperatura base superior (°C)	30	40
Fração de água disponível no solo (p) na camada superior do solo (adimensional)	0,25	0,20
Fração de água disponível no solo (p) na camada inferior do solo (adimensional)	0,55	0,50
Porosidade livre de aeração mínima (β_{min} ; m ³ m ⁻³)	0,10	0,10
Coeficiente de cultivo máximo (Kc_{Tx}) (adimensional)	1,20	1,10
Profundidade inicial do sistema radicular (z_o ; m)	0,10	0,10
Profundidade efetiva máxima do sistema radicular (z_m ; m)	1,35	1,00
Fator de forma (n ; adimensional)	15	15
Cobertura do dossel máxima (CDm ; %)	85	85

FONTE: adaptado de Allen et al. (1998).

REFERÊNCIAS

- Allen RG, Pereira LS, Raes D. Crop evapotranspiration. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper n. 56, 1998.
- Bhering SB, Santos HG, Manzatto CV, Bognola I, Carvalho AP, Potter O, Aglio MLD, Silva JS, Chaffin CE, Carvalho Junior W. Mapa de solos do Estado do Paraná. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2007.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop version 5.0 reference manual. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.